TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE LA

COMPENSATION

DES COMPAS

Vanberrewaeghe Gaston

BIBLIOTHÈQUE DES CAPITAINES DE COMMERCE
ET DES CANDIDATS AUX EXAMENS DE LA MARINE MARCHANDE

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE
DE LA
COMPENSATION
DES COMPAS

PAR

J. VALLEREY
Inspecteur d'Hydrographie O. ✻, ✿. I.

TROISIÈME ÉDITION



PARIS
AUGUSTIN CHALLAMEL, ÉDITEUR
17, RUE JACOB
Librairie Maritime et Coloniale.

1920

AVERTISSEMENT

Plusieurs lecteurs de notre Traité élémentaire de la Compensation des compas *nous ont reproché, avec quelque apparence de raison, d'avoir admis un peu trop aisément la possibilité de remplacer l'ensemble des fers du navire qui dévient l'aiguille aimantée par trois barres déviatrices simples.*

Pour répondre à leur désir, nous examinons, dans cette nouvelle édition, le cas général d'un compas entouré de pôles de fer dur et de barres de fer doux de position et d'orientation quelconques, tout en nous efforçant de garder à nos démonstrations le même caractère de simplicité qu'antérieurement.

Nous pensons y être parvenu en introduisant, pour la première fois, dans notre exposé, la notion nouvelle de masses magnétiques réduites. *Nous appelons ainsi les masses magnétiques qu'on obtient en transportant, dans le plan de la rose, les masses réelles après avoir multiplié leurs valeurs par un* coefficient réducteur, *de façon que l'action des masses réduites sur l'aiguille aimantée soit la même que celle des masses magnétiques réparties d'une manière quelconque dans le navire.*

Après avoir montré qu'on peut remplacer une barre de fer doux oblique, à tous les plans principaux du navire, par deux barres de fer doux : l'une verticale, l'autre horizontale, nous étudions isolément l'effet déviateur d'un ou plusieurs pôles de fer dur *placés d'une manière quelconque dans le navire, puis l'effet déviateur produit par une ou plusieurs barres de* fer doux vertical *placées d'une manière quelconque dans le navire, enfin l'action produite par une barre de* fer doux horizontale *d'orientation quelconque.*

Nous terminons cette étude en analysant la déviation totale produite par tous les fers durs et tous les fers doux du navire, ces fers ayant des emplacements et des directions quelconques.

Le lecteur qui ne voudrait pas pousser aussi loin son étude pourra se contenter d'étudier les paragraphes relatifs aux déviations produites isolément :

1° par un pôle quelconque de fer dur;

2° par un pôle quelconque de fer doux vertical ;

3° par un pôle de fer doux horizontal.

Il admettra alors que, sur le navire, la déviation produite par l'ensemble des fers du bord est le total de ces trois espèces de déviation.

Nous avons, du reste, indiqué par un astérisque les paragraphes dont on peut, à la rigueur, supprimer la lecture dans une première étude.

Nous avons, dans cette édition, ajouté à notre exposé quelques considérations très élémentaires sur les variations de la force directrice totale de l'aiguille aimantée dans les cas les plus simples.

En terminant, nous adressons nos sincères remerciements à M. le Professeur d'hydrographie Cornet, qui a bien voulu nous communiquer un très intéressant mémoire sur la compensation des compas. Nous avons mis à profit ce travail pour améliorer notablement quelques points de nos démonstrations.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE LA

COMPENSATION DES COMPAS

PREMIÈRE PARTIE

DÉVIATIONS DES COMPAS

NOTIONS SUCCINCTES SUR LE MAGNÉTISME TERRESTRE

1. Principes fondamentaux.

I. — Si on suspend une aiguille d'*acier non aimantée* au moyen d'un fil de soie de cocon soutenant une chape dont l'axe horizontal passe par le centre de gravité de l'aiguille, cette aiguille d'*acier non aimantée* se tient en équilibre dans toutes les directions possibles.

II. — Une aiguille d'*acier aimantée* CD (fig. 1), librement suspendue, de la même façon que précédemment, par son centre de gravité G, prend, dans un lieu donné, une direction particulière.

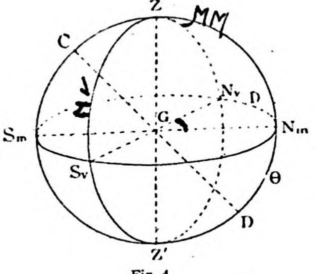


Fig. 1.

Elle s'oriente dans un plan vertical ZN_mZ', nommé *méridien magnétique du lieu*, et elle prend, dans ce plan, une *inclinaison* θ par rapport à l'horizon.

L'angle N_vGN_m, que fait, avec le méridien vrai ZN_vZ', le méridien magnétique ZN_mZ', prend le nom de *déclinaison* de l'aiguille aimantée.

On donne à la déclinaison le signe +, ou le nom de NE, quand le Nord magnétique tombe à droite du Nord vrai, le signe —, ou le nom de NO, quand le Nord magnétique tombe à gauche du Nord vrai.

III. — Quand on change de lieu, la déclinaison et l'inclinaison changent généralement de valeur. A Paris, la déclinaison vaut environ 14 degrés NO, et l'inclinaison 65 degrés.

IV. — Comme il est presque impossible de suspendre une aiguille aimantée ainsi que nous venons de le dire, on scinde l'opération théorique en deux parties : une aiguille aimantée, rendue horizontale par suite du déplacement de son centre de gravité par rapport au pivot d'un axe vertical, constitue la *boussole de déclinaison*. Une aiguille aimantée pouvant se déplacer verticalement autour d'un axe horizontal constitue la *boussole d'inclinaison*. Cette aiguille prend l'inclinaison indiquée par les cartes quand le plan vertical qui la contient est orienté dans le plan du méridien magnétique.

X 2. **Parallèles magnétiques, équateur magnétique.** — Le lieu géométrique des points de la surface du globe pour lesquels l'inclinaison θ a une même valeur se nomme le *parallèle magnétique* de θ degrés.

Le lieu géométrique des points du globe pour lesquels l'inclinaison θ est nulle prend le nom d'*équateur magnétique*.

Les parallèles et l'équateur magnétiques sont des courbes sinueuses qui ne suivent que de loin les parallèles et l'équateur terrestres. L'équateur magnétique coupe l'équateur terrestre en deux points situés, l'un par environ 170 degrés de longitude Ouest, l'autre par environ 5 degrés de longitude Ouest.

Au nord de l'équateur magnétique, la pointe N de l'aiguille d'inclinaison est dirigée vers le sol. A l'équateur magnétique, l'aiguille d'inclinaison se tient horizontale. Au sud de l'équateur magnétique, c'est la pointe Sud de l'aiguille qui se dirige vers le sol. Au moment où la pointe S commence à se diriger vers le sol, on dit que l'inclinaison change de signe.

On donne généralement à l'inclinaison le signe + dans l'hémisphère magnétique Nord, le signe — dans l'hémisphère magnétique Sud.

La carte placée à la fin de ce traité montre l'emplacement des parallèles et de l'équateur magnétiques.

3. **Masses magnétiques, leur comparaison.** — L'expérience montre que deux pôles de même nom se repoussent, que deux pôles de noms contraires s'attirent.

L'expérience montre encore que la grandeur de ces forces attractives ou répulsives est inversement proportionnelle au carré de la distance.

Ceci posé, si deux pôles de même nom P et P' placés successivement, à une distance donnée d, d'un pôle P'', de même nom que P et P', exercent sur ce pôle P'' la même force répulsive, on dit que ces pôles P et P' possèdent *la même masse magnétique.*

Si le pôle P exerce sur P'' une force répulsive n fois plus grande que le pôle P', on dit que le pôle P a une masse magnétique n fois plus grande que la masse magnétique du pôle P'.

4. **Unité de masse magnétique.** — On dit que la masse magnétique d'un pôle est égale à l'unité de masse, quand ce pôle exerce sur un pôle identique et de même nom, placé à l'unité de distance, une force répulsive égale à l'unité de force adoptée.

5. **Champ magnétique.** — On appelle, en général, *champ magnétique,* toute portion de l'espace où une

aiguille aimantée, librement suspendue par son centre de gravité, prend une direction déterminée.

La *direction du champ,* en un point donné du champ, est indiquée par la direction de l'aiguille aimantée librement suspendue. Le sens de cette direction est, par convention, celui qui va de la pointe Sud à la pointe Nord de l'aiguille librement suspendue.

6. Intensité d'un champ magnétique. — Tout le monde sait qu'une barre d'acier peut être plus ou moins fortement aimantée. Pour une barre donnée, on ne peut pas dépasser une certaine limite d'aimantation. On dit alors que la barre est aimantée à refus ou à saturation.

Une barre d'acier aimantée crée autour d'elle un champ magnétique plus ou moins intense dont l'action est d'ailleurs d'autant plus faible qu'on s'éloigne davantage du barreau aimanté.

7. Masse magnétique d'un pôle. — Si un pôle quelconque, P, placé à l'unité de distance d'un pôle de même espèce et de masse magnétique égale à l'unité, exerce sur lui une force répulsive égale à m unités de force, on dit que ce pôle P a une masse magnétique égale à m.

Il est clair que l'unité de force et l'unité de distance sont arbitraires.

8. Loi des attractions ou répulsions magnétiques ou loi de Coulomb. — Cette loi, trouvée par Coulomb, s'énonce de la manière suivante :

Deux pôles de même nom ayant des masses magnétiques m et m', placés à une distance d l'un de l'autre, se repoussent *proportionnellement à leurs masses et en raison inverse du carré de la distance.*

S'ils sont de noms contraires, ils s'attirent selon la même loi.

De là il résulte que la force qui repousse ou attire les pôles considérés peut s'écrire :

$$f = \frac{mm'}{d^2}.$$

En effet, par définition, un pôle (Nord, par exemple) de masse magnétique 1 repousse un autre pôle N de masse magnétique 1, placé à l'unité de distance, avec une force égale à 1.

Un pôle de masse magnétique m repoussera le pôle de masse magnétique m', placé à la distance d, avec une force inconnue f.

MASSE MAGNÉTIQUE	MASSE MAGNÉTIQUE	DISTANCE	FORCE
1	1	1	1
m	1	1	x
m	m'	1	y
m	m'	d	f

Pour trouver f, il suffit de résoudre une règle de trois composée.

Faisons varier successivement les masses et la distance; appelons x et y les inconnues auxiliaires. On aura, d'après la loi de Coulomb :

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{x}, \quad \text{d'où} \quad x = m;$$

$$\frac{1}{m'} = \frac{x}{y}, \quad \text{d'où} \quad y = m'x;$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{f}{y}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{y}{d^2}.$$

Multipliant les équations de la deuxième colonne membre à membre, il vient :

$$fxy = \frac{mm'xy}{d^2},$$

ou

$$f = \frac{mm'}{d^2}.$$



Ainsi, si on convient d'appeler *unité de masse magnétique* la masse magnétique qui, placée à 1 centimètre d'une masse magnétique identique, la repousse avec une force égale à 1 dyne, un pôle de masse magnétique égale à 200, placé à 1 mètre de distance d'un pôle de même nom ayant une masse magnétique égale à 400, le repoussera avec une force égale à

$$\frac{200 \times 400}{100^2} = \frac{80.000}{10.000} = 8 \text{ dynes.}$$

Si la distance devenait égale à 10 mètres, la force répulsive deviendrait 100 fois plus petite encore et tomberait à $0^{dyne},08$.

Ceci montre que le champ magnétique d'un pôle, bien que théoriquement indéfini, ne s'étend, pratiquement, qu'à une faible distance de ce pôle, et cette distance pratique sera d'autant plus faible que la masse magnétique de ce pôle est plus petite.

9. **Mesure des forces qui dirigent les aiguilles aimantées, et des forces déviatrices de ces aiguilles.** — Il importe, dès maintenant, de remarquer que, dans toutes les formules que nous établirons plus tard, nous ne considérerons jamais les forces réelles agissant sur les aiguilles aimantées, soit comme forces directrices, soit comme forces déviatrices, mais bien la valeur des forces directrices ou déviatrices *qui agiraient sur l'unité de masse magnétique* placée à chacun des pôles de ces aiguilles.

Ainsi, quand nous désignerons certaines forces directrices par F, H, Z, et les forces déviatrices par f, P, Q, φ, φ', etc., ces symboles ne représenteront pas la valeur en dynes des forces réelles sollicitant les pôles de l'aiguille aimantée, mais les forces qui agiraient sur l'unité de masse magnétique des pôles de cette aiguille.

Ainsi, quand nous disons que le pôle N de l'aiguille est soumis à une force horizontale terrestre H égale à 2, il

sera sous-entendu que c'est l'*unité de masse magnétique* de ce pôle qui est sollicitée par une force égale à 2 (2 dynes si on prend la dyne pour unité), alors que, si la masse magnétique du pôle est 8, la force réellement agissant sur ce pôle serait égale à 2×8 ou 16 dynes [1].

Il est facile de comprendre l'avantage de cette manière d'opérer : dans toutes les formules relatives aux compas, les forces directrices et les forces déviatrices agissant sur l'aiguille n'entrent jamais que par *leurs rapports.*

Supposons, par exemple, qu'on place à une distance d du pôle Nord de l'aiguille aimantée (ce pôle ayant une masse magnétique m) le pôle d'un aimant déviateur de masse magnétique m'.

Si on appelle H la force directrice horizontale exercée en général par la terre sur l'unité de masse magnétique, dans le lieu donné, la force directrice *totale* agissant sur le pôle Nord de l'aiguille de masse m sera égale à

$$H \times m \quad \text{ou} \quad mH.$$

D'autre part, le pôle de masse m' exercera sur le pôle de masse m placé à la distance d une action déviatrice

égale à $$\frac{mm'}{d^2}.$$

Le rapport des forces directrices et déviatrices, le seul dont on ait besoin dans toutes les formules, sera égal à

$$\frac{mH}{\left(\frac{mm'}{d^2}\right)}, \quad \text{ou} \quad \frac{H}{\left(\frac{m' \times 1}{d^2}\right)}.$$

Mais H représente l'action horizontale de la terre sur l'unité de masse magnétique en général et sur celle du pôle

---

[1] On fera bien de remarquer qu'alors que les forces F, H, Z dues au magnétisme terrestre ont la même valeur quelle que soit la position sur le navire de l'unité de masse magnétique attirée ou repoussée, les forces déviatrices f, P, Q, etc., ont une valeur qui dépend uniquement de la position des compas, sur le navire, par rapport aux masses déviatrices.

de l'aiguille en particulier; $\frac{m' \times 1}{d^2}$ représente l'action de la masse magnétique m' sur l'unité de masse magnétique du pôle de l'aiguille placée à la distance d.

On voit donc bien que, pour connaître le rapport des forces agissant réellement sur le pôle de l'aiguille aimantée, il suffit de considérer le rapport des actions respectives de la terre et de l'aimant déviateur sur l'*unité* de masse magnétique du pôle de l'aiguille aimantée, sans avoir à se préoccuper de la valeur même des forces en action.

10. **Champ terrestre.** — Puisque, dans un lieu donné, une aiguille aimantée librement suspendue prend une direction déterminée, c'est qu'elle se trouve placée dans un champ magnétique créé autour de la terre par une cause inconnue. Ce champ spécial prend le nom de *champ terrestre*.

Quoi qu'il en soit de cette cause, en deux points voisins, on constate que l'aiguille demeure sensiblement parallèle à elle-même.

On doit en conclure que la direction du champ, représentée, dans le lieu, par la direction Sud-Nord de l'aiguille d'inclinaison, est sensiblement constante; autrement dit, le champ terrestre est *uniforme* dans une région assez étendue (un mille carré, par exemple).

Sous l'action du champ terrestre, l'aiguille aimantée complètement libre prend une direction déterminée. Lorsqu'on l'écarte de sa position d'équilibre, elle y revient après quelques oscillations; tout se passe, par conséquent, comme si cette aiguille était soumise, dans le lieu, à deux forces égales et contraires parallèles à l'aiguille d'inclinaison. Si on écarte l'aiguille de sa position d'équilibre, ces deux forces forment un *couple* qui ramène l'aiguille dans sa première position parallèle à l'aiguille d'inclinaison dans le lieu. Ce couple prend le nom de *couple terrestre*. C'est lui qui donne à l'aiguille d'inclinaison de la boussole

d'inclinaison la direction qu'elle prend quand le plan vertical de cet instrument est exactement orienté dans le plan du méridien magnétique.

Nous désignerons par F la valeur de l'une des forces de ce couple agissant sur l'unité de masse magnétique de l'un des pôles de l'aiguille d'inclinaison.

Si m est la masse de chacun des pôles, l'aiguille est donc soumise à l'action d'un couple $(m\mathrm{F}, -m\mathrm{F})$.

Rappelons à nouveau qu'en France et, plus généralement, dans l'hémisphère magnétique Nord, c'est la pointe N qui est dirigée vers le sol.

Souvent on peint en rouge la pointe Nord, en bleu la pointe Sud. On dit alors à volonté : pôle Nord ou pôle rouge, pôle Sud ou pôle bleu. Conformément à l'usage actuellement adopté dans l'Université, nous dirons désormais pointe Nord, pôle Nord pour désigner l'extrémité de l'aiguille qui, en France, se dirige vers le Nord ; pôle Sud, pointe Sud, pour désigner celle qui se dirige vers le Sud.

Par analogie, on dira *pôle Nord* pour désigner le pôle d'un aimant tenu à la main, si ce pôle repousse la pointe Nord d'une aiguille aimantée libre d'osciller. Le pôle opposé prendra le nom de *pôle Sud*. Les pôles Nord des aimants employés dans la compensation des compas sont peints en rouge, les pôles Sud sont peints en bleu.

Si ces aimants étaient suspendus par leur centre de gravité, il est clair qu'ils s'orienteraient parallèlement à l'aiguille d'inclinaison.

11. Variation de F avec les lieux. — La force F, qui a été définie au paragraphe précédent, peut être considérée comme à peu près constante dans un même lieu. Elle change quand on change de lieu. Elle augmente de valeur quand on se rapproche des pôles terrestres, ou plus exactement de régions encore mal déterminées situées par de hautes latitudes.

12. Composantes du magnétisme terrestre. — Pour le besoin des calculs, on décompose souvent la force F, qui représente l'action de la terre sur l'unité de masse magnétique de chacun des pôles de l'aiguille d'inclinaison CD, en deux composantes : l'une horizontale H, l'autre

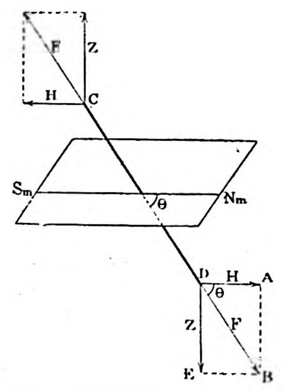


Fig. 2.

verticale Z. Il existe entre H, Z et F les relations suivantes, évidentes sur le rectangle ABED (fig. 2) :

$$Z = F \sin \theta; \qquad (1)$$

$$H = F \cos \theta; \qquad (2)$$

$$\frac{Z}{H} = \operatorname{tg} \theta; \qquad (3)$$

$$Z = H \operatorname{tg} \theta. \qquad (4)$$

13. Aiguille aimantée à bord. — Il serait difficile, à bord, de gouverner avec un compas dont l'aiguille serait inclinée. On rend l'aiguille horizontale en déplaçant son centre de gravité par rapport au pivot, de manière à annuler l'action du couple (Z, — Z).

On obtient ainsi le *compas* du bord, qui est au fond une véritable boussole de déclinaison.

Alors l'aiguille rendue horizontale n'obéit plus qu'au couple (H, — H), que nous appellerons le *couple directeur terrestre.*

Quand on change de lieu, Z change de valeur; si la rose prend alors une inclinaison gênante, on la redresse en collant en dessous, à l'endroit convenable, un peu de cire pour servir de contrepoids.

14. Cartes d'égale force horizontale. — La formule $H = F \cos \theta$ montre que H varie avec F et avec θ. Nous avons dit que près des pôles F augmente, mais $\cos \theta$ tend vers zéro et H diminue beaucoup.

On a dressé, par l'expérience, des cartes donnant les lieux terrestres pour lesquels H a la même valeur. Sur la carte placée à la fin de cette brochure, on constate que H est sensiblement double, près de l'équateur, de sa valeur dans la Manche. Du côté de l'Islande, H diminue rapidement. Plus H devient faible, plus le compas *dort*, c'est-à-dire obéit plus difficilement au couple directeur terrestre (H, — H); les frottements des pivots empêchent alors l'aiguille de revenir exactement au Nord, et ses oscillations deviennent très lentes.

15. Coordonnées d'un point placé à un endroit quelconque sur le navire. Direction d'une droite quelconque. — Pour indiquer la position d'un point quelconque P du navire par rapport à la rose R du compas, nous emploierons les coordonnées particulières suivantes.

Traçons par le centre de la rose un plan vertical ARZ′, parallèle au plan longitudinal du navire, et, par le point P, un plan vertical DRZ′P (fig. 3).

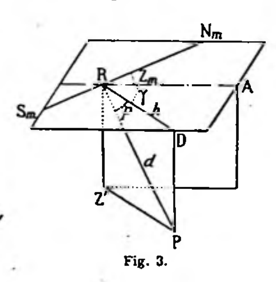


Fig. 3.

Nous appellerons *gisement* du point P l'angle dièdre formé par ces deux plans, cet angle étant mesuré par son rectiligne $ARD = \gamma$ (RA, direction de l'avant du navire).

Cet angle sera compté, à partir de l'avant, de zéro à 360° dans le sens des aiguilles d'une montre. Nous le représenterons dans les formules par α dans le cas du fer dur, par β dans le cas du fer doux vertical, par γ dans le cas du fer doux horizontal ou oblique.

Nous appellerons *pente* du point P et nous représenterons par p l'angle DRP que fait avec le plan horizontal de la rose la droite RP qui joint au point P le centre R de la rose.

Comme la rose occupe généralement les régions supérieures du navire, nous donnerons le signe + aux pentes comptées en dessous de la rose, le signe — aux pentes comptées en dessus.

Nous appellerons enfin *abscisse* du point P la longueur absolue h du segment RD, qui représente la projection de RP sur le plan de la rose.

Si on appelle d la distance RP du point R au point P, la projection h de RP sur le plan de la rose aura pour valeur :

$$h = d \cos p.$$

Les trois coordonnées du point P sont donc, dans le cas de la figure :

$$\gamma, \ p \text{ et } h.$$

Ces coordonnées demeurent invariables par rapport au navire, quand le navire change de cap.

On peut avoir besoin de connaître les coordonnées du point P par rapport au plan vertical du méridien magnétique et au plan de la rose.

Ces coordonnées seront :

$$Z_m + \gamma, \quad p \text{ et } h.$$

Mais, alors que p et h conserveront une valeur constante, la coordonnée $Z_m + \gamma$ changera de valeur au fur et à mesure que le navire changera de cap, le méridien magnétique restant immobile dans l'espace.

Enfin, comme les barres de fer doux obliques aux plans principaux du navire s'aimantent d'après leur direction par rapport à l'aiguille d'inclinaison, nous préciserons cette direction par deux coordonnées spéciales (fig. 4).

Nous appelons *inclinaison* de la barre PP_1 l'angle I qu'elle fait avec le plan horizontal de la rose, et *orientation* de la barre l'angle ψ qu'elle fait avec un plan parallèle au plan longitudinal ou avec ce plan lui-même.

Ces deux coordonnées sont fixes sur le navire. Par rapport au méridien magnétique, l'inclinaison gardera la même valeur I quand le navire évoluera; mais l'angle de la barre avec le méridien magnétique, qui demeure immobile dans l'espace, aura une valeur variable avec le cap et égale à $Z_m + \psi$.

Remarque. — Si $\gamma = \psi$, la barre est située dans un plan

vertical passant par la verticale RZ′ du centre du compas. Nous appellerons *fer rayonnant* le fer doux qui se trouvera dans ces conditions.

Si on a en même temps $I = 0$, le fer rayonnant est horizontal.

Si $I = 0$, mais $\psi \neq \gamma$, le fer est horizontal, mais n'est pas rayonnant.

Enfin, si $p = p_1 = 0$, les deux pôles sont dans le plan de la rose; l'aiguille est horizontale et I est naturellement égal à zéro.

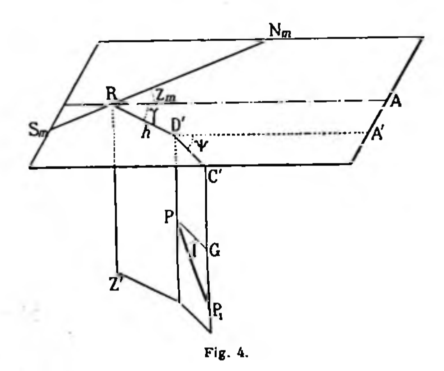


Fig. 4.

16. **Définitions.** — La direction qu'indique la pointe Nord d'un compas placé à terre, ou, à bord, sur un navire en bois, loin de toute matière ferrugineuse, prend le nom de *Nord magnétique*.

Sur les navires en fer, ou en bois avec pièces en fer ou chargement en fer, l'aiguille est écartée par ce fer du méridien magnétique et fait avec le méridien magnétique un angle généralement variable avec le cap, qu'on appelle *déviation* de l'aiguille aimantée.

La déviation est dite NE quand le Nord du compas se trouve dévié à droite du Nord magnétique. Elle est dite NO

quand le Nord du compas se trouve dévié à gauche du méridien magnétique.

On donne le signe + aux déviations NE, le signe — aux déviations NO.

17. **Fer doux.** — On appelle *fer doux* du fer chimiquement pur. Ce fer possède la propriété remarquable que, placé dans un champ magnétique, même de faible intensité, il s'aimante instantanément par induction de ce champ magnétique. Si on écarte le fer doux du champ ou si on supprime le champ, le fer doux se désaimante instantanément.

L'aimantation du fer doux a lieu également sous l'influence du champ terrestre.

En particulier, quand une barre de fer doux est tenue parallèle à l'aiguille d'inclinaison, elle s'aimante sous l'influence du champ magnétique terrestre. Il se forme alors (dans nos régions) un pôle Nord vers l'extrémité de la barre qui est dirigée vers le sol, un pôle Sud à l'extrémité la plus relevée[1].

Si on retourne la barre bout pour bout, les pôles changent de bout par rapport à la barre; il se forme encore un pôle N en bas, un pôle S en haut.

18. **Lois de l'aimantation du fer doux par induction terrestre.**

Première loi. — Une barre de fer doux CD (fig. 5) tenue parallèlement à l'aiguille d'inclinaison s'aimante sous l'influence du champ terrestre. C'est dans cette situation qu'elle emmagasine le maximum possible d'aimantation.

La masse magnétique du pôle ainsi formé est propor-

[1] Pour vérifier qu'il y a en bas un pôle Nord, approchez le bout inférieur de la barre de la pointe N d'une petite aiguille aimantée sur pivot : il y aura répulsion de la pointe N de l'aiguille. Retournez bout pour bout, approchez encore le bout inférieur : il y a encore répulsion. Si le fer n'est pas parfaitement doux, il peut y avoir attraction à ce moment, mais si on frappe sur la barre avec un marteau, le magnétisme induit reprend bien le sens que nous avons indiqué.

tionnelle à la force inductrice de la terre F et à la section S de la barre. Cette masse magnétique est donc donnée par une expression de la forme kSF, k étant un coefficient qui dépend de la nature du fer considéré.

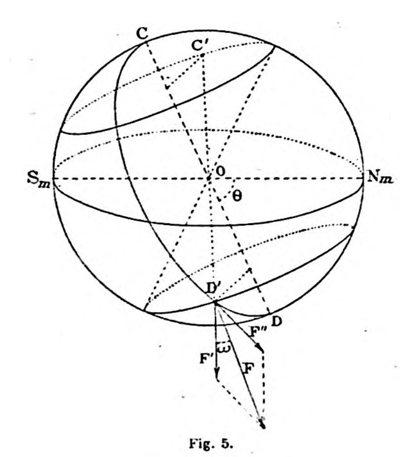


Fig. 5.

Deuxième loi. — Si on maintient la barre de fer doux C'D' (fig. 5) dans une position telle qu'elle fasse avec la direction CD de l'aiguille d'inclinaison un angle ω, elle ne s'aimante plus que proportionnellement à la grandeur de la composante F' de la force totale F du magnétisme terrestre, dans le sens de la longueur de la barre.

En d'autres termes, si on décompose F en deux forces : l'une F', dans le sens de la barre, l'autre F'', perpendiculaire à la barre, tout se passe comme si le travail d'aimantation de la force F'' était nul, et si l'aimantation acquise par la barre n'était proportionnelle qu'à la seule composante F', c'est-à-dire à $F \cos \omega$.

On aura donc, en valeur absolue :

$$\text{Masse magnétique pôles} = kSF \cos \omega,$$

Glubierrenghe Jordan.

k étant un coefficient qui dépend de la nature du fer considéré, coefficient que nous désignerons sous le nom de *coefficient de susceptibilité* de la barre.

[On peut, si on veut, donner un signe aux masses magnétiques, par exemple le signe + aux masses N qui repoussent la pointe N d'une aiguille aimantée. Si alors on considère une barre AB comme un *segment* commençant en A et finissant en B, BA comme un segment commençant en B et finissant en A, on aura le signe des masses magnétiques de chaque pôle en écrivant :

m_A ou masse magnétique A $= - k$SF cos (AB . F);
m_B ou masse magnétique B $= - k$SF cos (BA . F).]

Il résulte de là que l'aimantation par induction terrestre d'une barre de fer doux est maxima pour $\omega = 0$.

Elle diminue quand ω augmente. Elle garde la même valeur si on fait tourner la barre C'D' autour de CD (fig. 5), en maintenant ω constant.

Elle est nulle quand $\omega = 90°$, c'est-à-dire quand la barre est dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, ce qui a lieu, en particulier, quand elle est orientée selon la ligne EO magnétique.

Quand ω dépasse 90 degrés, l'aimantation change de sens. Le pôle N se forme toujours en bas (dans l'hémisphère magnétique Nord), le pôle S en haut, et l'aimantation repasse par les mêmes valeurs.

Remarque. — Les pôles d'un barreau sont toujours voisins des extrémités du barreau. La distance des pôles aux extrémités du barreau varie entre le $\frac{1}{6}$ de la longueur pour les barreaux très courts ($l < d$), et $8d$ pour les barreaux dont la longueur dépasse $50d$ (d, diamètre; l, longueur).

19. **Explication élémentaire des lois de l'aimantation du fer doux par induction terrestre.** — Supposons que dans un canal dont le courant a une direction v

(fig. 6) on tienne plongé à une certaine profondeur un tube AB de section S. Si on tient ce tube dans le sens même du courant, comme en AB, une certaine quantité d'eau passera dans le tube, de A vers B, en un temps donné.

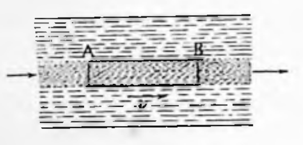


Fig. 6.

Si on double, si on triple, etc., la section du tube, la quantité d'eau qui traversera le tube, dans un temps donné, sera doublée, triplée, etc., de sorte qu'on peut dire, plus généralement, que la quantité d'eau qui traverse le tube dans un temps donné est proportionnelle à la *section* S du tube.

Si le courant est deux, trois, quatre fois plus rapide, la quantité d'eau qui passe en un temps donné devient deux, trois, quatre fois plus grande. Elle est, par conséquent, proportionnelle à ce qu'on nomme communément la *force* du courant.

Si on incline le tube par rapport au courant (fig. 7), l'entrée du tube se présente obliquement au courant; l'entrée de l'eau est limitée à un tube fictif dont la section s est égale à $S \cos \omega$, si on appelle ω l'angle que fait le tube avec le courant, cet angle étant celui des vecteurs v et AB.

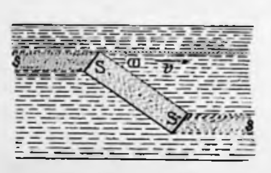


Fig. 7.

La quantité d'eau qui traverse le tube en un temps donné est donc proportionnelle au facteur $\cos \omega$.

Cette quantité d'eau, étant proportionnelle à la section S du tube, à la force F du courant et à $\cos \omega$, est proportionnelle au produit de ces trois quantités, si elles varient simultanément.

On remarquera que, si $\omega = 90^\circ$, c'est-à-dire si le tube est maintenu en travers du courant, le courant est nul; si ω dépasse 90°, le courant, au lieu de traverser le tube de A en B, le traverse de B en A.

Un phénomène analogue a lieu pour les barres de fer doux plongées dans le champ terrestre. Assimilons ce champ magnétique à un courant dont le *flux*, proportionnel à la force que nous avons dénommée F, a pour direction générale, en un lieu donné, le sens S ⟶ N de l'aiguille d'inclinaison. Les barres de fer doux canalisant en quelque sorte ce flux comme le tube dont nous avons parlé.

Le flux qui traverse la barre de fer doux est proportionnel, par conséquent, comme dans le cas du canal examiné plus haut, à la section S du tube, à l'intensité F du flux et au cosinus de l'angle que fait la barre avec la direction du flux, c'est-à-dire avec l'aiguille d'inclinaison.

Les masses magnétiques égales et de signes contraires qui se forment près de l'entrée et de la sortie du flux sont proportionnelles à la grandeur du flux qui traverse la barre de telle sorte qu'on a bien, comme nous l'avons expliqué au paragraphe précédent :

$$\text{Masse magnétique pôles} = k\text{SF} \cos \omega.$$

Dans cette formule, k représente la masse magnétique des pôles créés près des extrémités de la barre de fer doux par l'action d'un champ magnétique de *force égale à l'unité,* la barre ayant une *section égale à l'unité* et le *cosinus* de l'angle ω étant *égal à* 1, ce qui a lieu pour ω égal à zéro.

X 20. **Fer doux vertical.** — Si une barre de fer doux PP_1 (fig. 8) est maintenue constamment verticale, elle s'aimante par induction du champ terrestre, et la masse magnétique du pôle P est donnée par la formule

$$m_P = -k\text{SF} \cos (PP_1.F),$$

ou

$$m_P = -k\text{SF} \sin \theta.$$

Généralement, F est moins bien connu que H.

Remplaçons F par $\frac{H}{\cos\theta}$.

Il viendra :

$$m_P = - kSH \operatorname{tg} \theta.$$

La masse magnétique de P_1 est de signe (ou de nom) contraire à celui de P. On a donc :

$$m_{P_1} = + kSH \operatorname{tg} \theta.$$

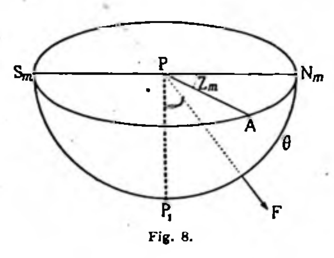


Fig. 8.

Rappelons qu'en France le point P est un pôle S, le point P_1 un pôle Nord.

Il résulte de ces formules que les masses magnétiques des pôles d'une barre de fer doux verticale varient avec la latitude magnétique.

Cette aimantation est donc variable avec le lieu. A l'équateur magnétique, où tg θ est nul et H fini, l'aimantation du fer doux vertical est nulle : *le fer doux vertical est désaimanté à l'équateur magnétique.* Si on franchit l'équateur magnétique, l'aimantation change de sens et repasse par les mêmes valeurs absolues pour les mêmes valeurs de H tg θ, c'est-à-dire de Z.

On peut dès maintenant remarquer que, dans un même lieu, si un navire change de cap, les barres de fer doux verticales du navire, conservant par rapport au méridien magnétique une direction invariable, ont une aimantation constante sous l'action de la terre et, par conséquent, la masse magnétique de leurs pôles demeure invariable malgré les changements de cap.

X 21. **Fer doux horizontal.** — Soit PP_1 une barre de fer doux située dans le plan horizontal $N_mP_1S_m$ (fig. 9).

D'après la formule qui fait connaître la masse magnétique d'une barre de fer doux quelconque, nous avons dans le cas actuel :

$$m_p = -\text{KSF}\cos(\text{PP}_1.\text{F}),$$

ou $$m_p = -\text{KSF}\cos \text{P}_1\text{B}.$$

Mais dans le triangle $N_m P_1 B$, rectangle en N_m,

on a : $$\cos \text{P}_1\text{B} = \cos\theta \cos(Z_m + \psi).$$

Donc $$m_p = -\text{KSF}\cos\theta\cos(Z_m + \psi),$$

et, comme $$\text{F}\cos\theta = \text{H},$$

$$m_p = -\text{KSH}\cos(Z_m + \psi),$$

la droite PA représentant une parallèle au plan longitudinal du navire.

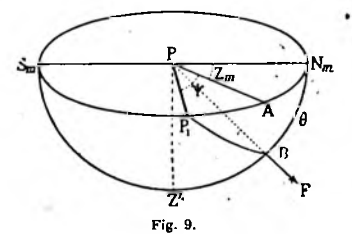


Fig. 9.

Il résulte de la formule ci-dessus que la valeur de m_p est proportionnelle au cosinus de l'angle $Z_m + \psi$, et change, par conséquent, quand le navire change de cap. Elle est maxima pour

$$Z_m + \psi = 0,$$

nulle pour $Z_m + \psi = 90°$, change alors de signe, repasse par un maximum absolu pour $Z_m + \psi = 180°$, redevient nulle pour $Z_m + \psi = 270°$, change de signe et atteint un maximum en valeur absolue pour $Z_m + \psi = 360°$. En d'autres termes, une barre de fer doux horizontale s'aimante au maximum quand elle est orientée NS, et se désaimante quand elle est EO, les pôles changeant de nom quand, par changement de cap, on dépasse la ligne EO.

Enfin, si on change de lieu, l'aimantation de la barre PP_1 étant proportionnelle à $H\cos(Z_m + \psi)$, pour un même cap Z_m l'aimantation de la barre PP_1 en deux lieux différents est directement proportionnelle à H.

22. Fer doux d'orientation quelconque. — *Remplacement d'un pôle de fer doux quelconque par deux pôles de fer doux appartenant, l'un à une barre de fer doux verticale, l'autre à une barre de fer doux horizontale.*

Soient P et P_1 les deux pôles d'une barre de fer doux de section S, ayant par rapport à l'aiguille d'inclinaison PB une direction quelconque.

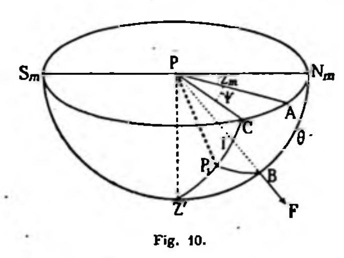


Fig. 10.

Nous savons que la barre de fer doux PP_1 s'aimante par induction terrestre, proportionnellement à sa section S, à la grandeur de F et au cosinus de l'angle que PP_1 fait avec F.

Pour mesurer cet angle, traçons une sphère de centre P et de rayon PP_1 (le rayon est d'ailleurs arbitraire). Soit PA la direction de l'avant du navire, Z_m son cap magnétique N_mPA. Les coordonnées déterminant la direction de PP_1 sont : son orientation $APC = \psi$ et son inclinaison $CPP_1 = I$. L'angle N_mPC a pour valeur $Z_m + \psi$.

L'angle de PP_1 et de l'aiguille d'inclinaison PB est mesuré par l'arc de grand cercle P_1B.

Cet angle est facile à calculer dans le triangle sphérique $P_1Z'B$. On a, en effet, dans ce triangle :

$$\cos P_1B = \sin \theta \sin I + \cos \theta \cos I \cos (Z_m + \psi).$$

La masse magnétique de chacun des pôles de la barre de fer doux PP_1 est donnée, *en valeur absolue*, par la formule

$$\text{masse magnétique de } P = KSF \cos P_1B,$$

K représentant un coefficient que nous avons nommé coefficient de susceptibilité de la barre. Remplaçant $\cos P_1B$ par sa valeur, il vient :

Masse magnétique de P

$$= \text{KSF} \sin\theta \sin \text{I} + \text{KSF} \cos\theta \cos \text{I} \cos (\text{Z}_m + \psi),$$

ou, en remplaçant F par $\frac{\text{H}}{\cos\theta}$:

Masse magnétique de P

$$= \text{KS}\frac{\text{H}}{\cos\theta} \sin\theta \sin \text{I} + \text{KS}\frac{\text{H}}{\cos\theta} \cos\theta \cos \text{I} \cos (\text{Z}_m + \psi),$$

ou $$= \text{KSH} \operatorname{tg}\theta \sin \text{I} + \text{KSH} \cos \text{I} \cos (\text{Z}_m + \psi).$$

Cette formule qui fait connaître la valeur de la masse magnétique des pôles de la barre PP_1 se réduit à

$$\text{KSH} \operatorname{tg}\theta,$$

si $\text{I} = 0$ (barre verticale),

et à $$\text{KSH} \cos (\text{Z}_m + \psi),$$

si $\text{I} = 90°$ (barre horizontale).

Nous retrouvons ainsi les résultats obtenus antérieurement.

On peut remarquer que si on pose :

$$\text{KS}_1\text{H} \operatorname{tg}\theta = \text{KSH} \operatorname{tg}\theta \sin \text{I},$$

c'est-à-dire : $$\text{S}_1 = \text{S} \sin \text{I},$$

et $$\text{KS}_2\text{H} \cos (\text{Z}_m + \psi) = \text{KS} \cos \text{I} \cos (\text{Z}_m + \psi),$$

c'est-à-dire : $$\text{S}_2 = \text{S} \cos \text{I},$$

la masse magnétique de P prend la forme

$$\text{KS}_1\text{H} \operatorname{tg}\theta + \text{KS}_2\text{H} \cos (\text{Z}_m + \psi).$$

On voit donc que la masse magnétique d'un pôle P *d'une barre de fer doux oblique, de direction et d'inclinaison quelconques, peut être remplacée par la somme des masses magnétiques de deux pôles de fer doux appartenant, l'un à une barre de fer doux verticale, l'autre à une barre de fer doux horizontale ayant le même coefficient* K *et des sections respectivement égales à*

$$\text{S} \sin \text{I} \quad \text{et} \quad \text{S} \cos \text{I},$$

ces pôles ayant les mêmes coordonnées que le pôle P.

23. Fers durs. — Les fers durs sont des fers qui contiennent, combinées dans leur masse, des substances autres que du fer, comme du carbone, du nickel, du chrome, etc.

Ces fers, placés dans les mêmes conditions que les fers doux au point de vue de leur orientation, s'aimantent par induction plus lentement que le fer doux, exigent pour s'aimanter un champ magnétique intense; toutefois, placés dans un champ magnétique de faible intensité, ils s'aimantent progressivement, si on les soumet. pendant un temps prolongé à des ébranlements moléculaires violents, comme ceux que produisent, pendant la construction d'un navire, le laminage des tôles, leur torsion leur martelage et rivetage.

Lorsque le fer dur s'est ainsi aimanté, il conserve son aimantation quand on le change de direction, contrairement à ce qui se passe pour le fer doux. Le fer dur une fois aimanté peut être assimilé à un aimant permanent.

Il résulte de là que, pendant la construction du navire, les fers durs qui constituent la coque et la charpente s'aimantent sous l'action du champ terrestre, chaque pièce de fer dur prenant une aimantation qui dépend de son orientation. Le magnétisme ainsi emmagasiné constitue ce qu'on nomme le *magnétisme permanent* du navire. En réalité, comme les fers du navire ne sont pas absolument des fers durs, mais des fers mixtes, une partie du magnétisme accumulé pendant la construction disparait après le lancement, et au bout de quelques mois le magnétisme permanent a pris une valeur à peu près invariable désormais.

X **24. Classification des fers du navire.** — Bien qu'il n'y ait pas à bord des fers absolument doux, ni de fers absolument durs, on peut considérer une barre de fer mixte comme formée de deux barres distinctes : l'une en fer doux, l'autre en fer dur, le rapport de ces barres entre

elles pouvant varier suivant que le fer considéré est plus ou moins doux, plus ou moins dur.

Pareillement, on peut, au point de vue de l'emplacement des fers du bord et de leur nature, ranger tous ces fers dans les trois catégories suivantes :

A. — Un certain nombre de barres de *fer dur* P_1P_2, $P'_1P'_2$, etc., dont les pôles, de masses magnétiques invariables, occupent dans le navire des positions quelconques. Il n'y a pas à se préoccuper de l'orientation de ces barres, puisque leur aimantation est indépendante du cap du navire. Le champ magnétique créé par ces barres constitue ce qu'on appelle le *magnétisme permanent du navire.* Il suffit, pour étudier l'effet de ces barres, de connaître isolément la nature de chaque pôle, ses coordonnées et sa mesure.

Pour représenter les coordonnées de ces pôles de fer dur, nous emploierons les désignations que nous avons dénommées *gisement*, *pente* et *abscisse.* Par convention, nous emploierons les lettres α_1, α_2, α_3, etc., pour représenter les gisements de ces pôles de fer dur.

B. — Un certain nombre de barres de *fer doux vertical* dont les deux pôles ont des masses magnétiques égales et de signes contraires, résultant de l'induction du champ terrestre sur la barre. Ces masses magnétiques sont constantes tant qu'on ne change pas de latitude magnétique, et produisent sur le compas des déviations analogues à celles qui résultent de la présence du fer dur, avec cette différence que ces déviations changent avec la latitude magnétique, s'annulent à l'équateur magnétique et changent de sens quand on franchit cet équateur magnétique.

Les deux pôles d'une même barre de fer doux ont même abscisse h, même gisement β. Les pentes p_1, p_2 peuvent être quelconques.

C. — Un certain nombre de barres de fer doux horizontal dont l'aimantation change avec le cap du navire, et

avec les variations de la force horizontale H du magnétisme terrestre quand on change de lieu.

Pour définir une de ces barres, il faut connaitre les coordonnées de chacun de ses pôles, dont les gisements seront spécialement désignés par γ_1, γ_2, etc. Mais il faut aussi connaître l'orientation de la barre que nous désignerons par ψ et son inclinaison I.

Remarque. — Nous ne faisons pas entrer en ligne de compte les masses magnétiques des barres de fer doux obliques aux plans principaux du navire, car nous avons vu que les masses magnétiques de cette nature peuvent se remplacer par les masses magnétiques de deux barres de fer doux : l'une verticale, l'autre horizontale.

Nous rangerons ces masses magnétiques fictives : les premières dans la catégorie B des barres de fer doux vertical, les secondes dans la catégorie C des barres de fer doux horizontal.

Ces principes posés, nous commencerons par étudier isolément les effets produits par des masses magnétiques des catégories A, B et C. Nous supposerons ces masses placées à des endroits quelconques du navire. Afin de trouver facilement les équations d'équilibre, nous transporterons toutes ces masses magnétiques dans le plan de la rose; nous les remplacerons, comme il va être expliqué, par les *masses magnétiques réduites équivalentes*.

---

25. Transfert dans le plan de la rose de toutes les masses magnétiques du navire. — Masses magnétiques réduites. — Le compas C (fig. 11), placé sur le navire, est entouré de tous côtés par des masses magnétiques M, M′, etc., les unes constantes avec le cap, les autres variables avec ce cap.

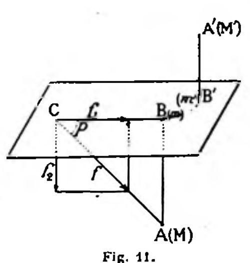


Fig. 11.

Les forces déviatrices émanant de ces masses magnétiques ont des directions généralement quelconques. Pour faciliter l'étude de la déviation qu'elles produisent sur le compas, nous ramènerons ces masses magnétiques dans le plan de la rose aux pieds B, B′, ..., des perpendiculaires abaissées de chacune d'elles sur le plan de la rose, en diminuant leur valeur de manière que l'effet de déviation qu'elles produiront sur l'aiguille aimantée ne soit pas altéré par ce transfert.

La masse magnétique M placée en A exerce sur l'unité de masse magnétique du pôle N de l'aiguille placée en C une force f. Supposons qu'elle soit attractive.

Si on appelle d la distance CA, la force f aura pour valeur :

$$\frac{M \times 1}{d^2}, \quad \text{ou} \quad \frac{M}{d^2}.$$

La composante horizontale f_1 de cette force agit seule pour dévier le compas. Elle a pour valeur :

$$f \cos p, \quad \text{ou} \quad \frac{M}{d^2} \times \cos p,$$

p désignant l'angle de pente du point A.

Cherchons quelle devrait être la valeur m d'une masse magnétique, placée en B, capable de produire sur la pointe N de l'aiguille placée en C le même effet déviateur que la masse M placée en A.

La masse inconnue m placée en B produira sur l'unité de masse magnétique du pôle N de l'aiguille une attraction donnée par la formule $\frac{m}{h^2}$,

en posant $BC = h$.

Pour que cette attraction soit égale à f_1, il faut que l'on ait :

$$\frac{m}{h^2} = \frac{M}{d^2} \times \cos p.$$

On tire de là :

$$m = \frac{Mh^2 \cos p}{d^2}.$$

Mais on a :

$$h = d \cos p.$$

Par suite,

$$m = M \cos^2 p \times \cos p = M \cos^3 p.$$

Nous appellerons *masses magnétiques réduites équivalentes* ou, plus simplement, *masses réduites*, les masses magnétiques réelles ainsi ramenées en projection dans le plan de la rose avec une valeur diminuée. De la formule qui précède nous pouvons conclure que, pour ramener dans le plan de la rose les masses magnétiques réparties en des points quelconques du navire, il suffit de multiplier leur valeur réelle par le *facteur réducteur* $\cos^3 p$.

Les masses magnétiques réduites, alors placées toutes dans le plan de la rose, produiront sur l'aiguille aimantée les mêmes déviations que les masses magnétiques réelles placées dans le navire en des endroits quelconques.

Application. — *Une barre de fer doux vertical* (fig. 12) *a deux pôles de masses magnétiques égales* M, *mais de signes contraires, ayant pour pentes respectives* 45 *et* 60 *degrés. Quelle sera la résultante des efforts horizontaux déviateurs*

exercés par ces pôles sur l'unité de masse magnétique du pôle N de l'aiguille aimantée placée en C?

Les deux masses réelles M ramenées dans le plan de la rose pourront, au point de vue de leurs effets déviateurs, être remplacées par les *masses réduites équivalentes :*

$$M \cos^3 45 \quad \text{et} \quad M \cos^3 60^\circ,$$

soit :

$$M \times 0{,}71^3 \quad \text{et} \quad M \times 0{,}5^3.$$

Fig. 12.

Mais les masses M placées en P et P' sont de signes conraires.

L'action déviatrice de la barre de fer doux sur l'unité de masse magnétique de l'aiguille aimantée sera égale, par conséquent, à

$$\frac{M \times 0{,}71^3}{h^2} - \frac{M \times 0{,}5^3}{h^2}.$$

Autre exemple. — *Une barre de fer doux a son pôle supérieur placé dans le plan de la rose; la pente du pôle inférieur est égale à 60°. On demande quel sera l'effet produit sur la rose.*

L'attraction exercée par le pôle supérieur de la barre (si nous sommes dans l'hémisphère magnétique Nord) sur l'unité de masse magnétique du pôle N de l'aiguille aura pour valeur : $\frac{M}{h^2}$.

Le pôle inférieur exercera la même répulsion qu'une *masse magnétique réduite équivalente*, placée dans le plan de la rose au même endroit que le pôle supérieur, cette masse réduite ayant pour valeur :

$$M \cos^3 60^\circ,$$

c'est-à-dire : $0{,}125\ M.$

Tout se passera comme si l'unité de masse magnétique

du pôle N de l'aiguille était attirée par une masse magnétique égale à $M - 0{,}125\,M$,

soit : $0{,}875\,M$.

L'attraction sur l'unité de masse magnétique du pôle N de l'aiguille aimantée sera donc égale à

$$\frac{0{,}875\,M}{h^2}.$$

On trouvera l'application de ce dernier exemple dans l'usage de la barre compensatrice de fer doux connue sous le nom de *barre de Flinders*. En laissant le pôle supérieur de cette barre dans le plan de la rose, et allongeant cette barre *par en bas*, ce qu'on obtient en disposant des cylindres successifs de fer doux *au-dessous les uns des autres*, on éloigne du pôle supérieur le pôle inférieur et on augmente ainsi l'effet compensateur de la barre, car cet effet est donné par la formule résultant de la théorie qui précède :

$$\frac{M(1 - \cos^3 p)}{h^2}.$$

Remarquons enfin que, si le plan horizontal de l'aiguille aimantée partage en deux parties égales une barre de fer doux vertical, les forces attractives et répulsives exercées par les pôles de cette barre sont égales et de sens contraires. La barre est donc sans action sur l'aiguille aimantée. On dit, dans ce cas, que l'aiguille aimantée est placée dans le plan de *l'équateur* de la barre de fer doux.

26. **Formule générale de l'équilibre, à un cap donné, d'une aiguille aimantée déviée par une force unique de direction horizontale, agissant dans le plan de la rose et ayant, à ce cap, une valeur connue φ.** — Supposons que, le navire ayant le cap magnétique Z_m, d'un point M (fig. 13), de gisement ω, placé dans le plan de la rose, émane un champ magnétique exerçant sur la pointe N de l'aiguille aimantée, placée en A, une action, d'intensité φ, pour le cap Z_m (fig. 13).

Pour fixer les idées, supposons que cette force soit attractive de la pointe N (rouge) de l'aiguille aimantée placée en A, et répulsive de la pointe S (bleue). Vu les faibles dimensions de l'aiguille, les deux forces qui agissent à ses extrémités peuvent être considérées comme égales et parallèles à la direction AM.

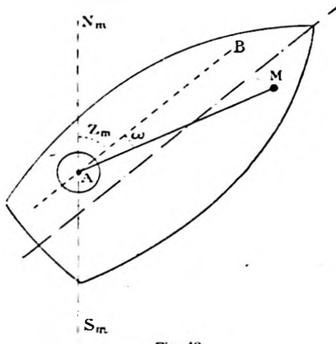


Fig. 13.

Il résulte de là qu'on peut considérer l'aiguille comme soumise à un couple déviateur (φ, $-\varphi$) (fig. 14). D'autre part, le champ magnétique terrestre[1] développe un couple redresseur de valeur (H, — H), qui tend à ramener l'aiguille dans le plan du méridien magnétique. Sous l'action du couple déviateur (φ, $-\varphi$), l'aiguille s'écartera du plan du méridien magnétique, et l'équilibre aura lieu quand l'aiguille sera orientée suivant la résultante R des deux forces φ et H[2].

---

[1] Généralement, on emploie pour désigner le cap magnétique la lettre ζ (zéta), et pour le cap au compas la lettre ζ'. Vu la difficulté de l'emploi de ces signes, j'ai employé, dans toutes les formules, les dénominations Z_m et Z_c pour désigner les caps.

[2] Rappelons que H représente l'intensité d'action de la force horizontale de la terre sur l'unité de masse magnétique de chacun des pôles de l'aiguille, que φ représente pareillement l'intensité d'action du champ magnétique émanant de M sur les mêmes unités de masse magnétique.

D'après la formule connue du parallélogramme des forces[1], on aura alors :

$$\frac{\varphi}{\sin \delta} = \frac{H}{\sin (Z_c + \omega)}; \qquad (5)$$

ou

$$H \sin \delta = \varphi \sin (Z_c + \omega). \qquad (6)$$

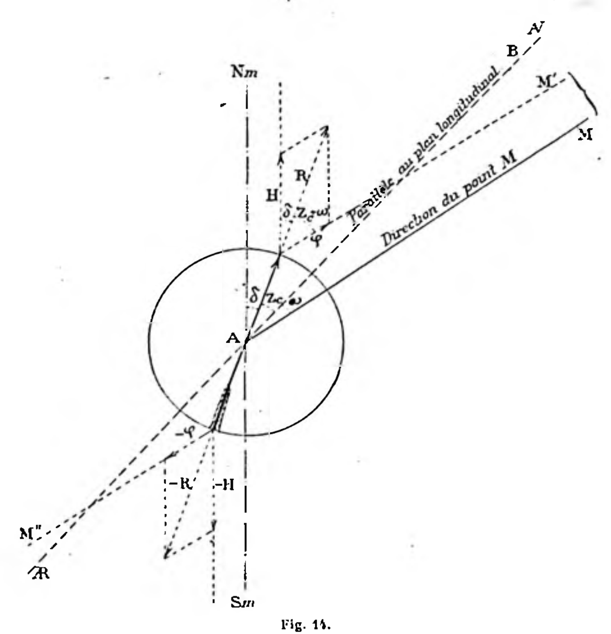


Fig. 14.

27. Formule générale de l'équilibre à un cap quelconque d'une aiguille aimantée déviée par des forces quelconques de direction horizontale, agissant toutes

[1] Rappelons que cette formule s'énonce ainsi : *le rapport de chaque force au sinus de l'angle des deux autres est constant.*

dans le plan de la rose, ces forces ayant, à ce cap, des valeurs connues φ, φ', φ'', etc. — Désignons par α, β, γ, etc. (fig. 15), les angles que les forces φ, φ', φ'' font avec le plan longitudinal.

L'aiguille aimantée se trouve soumise aux effets suivants :

1° Le couple directeur terrestre (H, — H);

2° Les couples (φ, — φ), (φ', — φ'), etc.

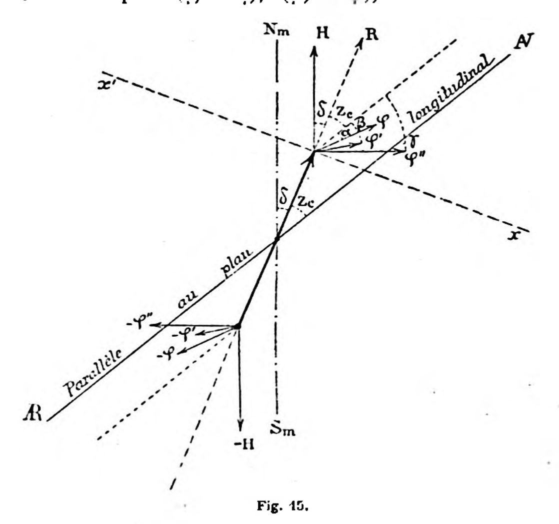


Fig. 15.

On obtiendra l'équation de l'équilibre en remarquant que l'aiguille ne peut se maintenir en équilibre que si elle s'est orientée suivant la résultante R des forces H, φ, φ', φ'', etc.

Graphiquement, cette résultante s'obtiendrait par la règle du polygone des forces. Le vecteur qui ferme le polygone des vecteurs H, φ, φ', φ'', etc., somme géométrique de ces vecteurs, donne la résultante cherchée.

Ceci posé, si on projette (fig. 15) toutes les forces dont il vient d'être question sur un axe $x'x$ perpendiculaire à R,

comme la projection de la résultante est égale à la somme algébrique des projections des composantes, la projection de R sur $x'x$ étant nulle, on aura, en choisissant le sens x comme sens positif :

$$0 = H \cos(H \,.\, x) + \varphi \cos(\varphi \,.\, x) + \varphi' \cos(\varphi' \,.\, x) + \ldots$$

ou

$$0 = - H \sin \delta + \varphi \sin(Z_c + \alpha) + \varphi' \sin(Z_c + \beta) + \ldots,$$

car H fait avec la partie positive de l'axe $x'x$ un angle égal à $90 + \delta$, et les forces φ, φ', φ'', etc., font avec ce même axe des angles respectivement égaux à

$$90^\circ - (Z_c + \alpha), \quad 90^\circ - (Z_c + \beta), \quad \text{etc.}$$

On a donc, en fin de compte :

$$H \sin \delta = \varphi \sin(Z_c + \alpha) + \varphi' \sin(Z_c + \beta) + \ldots \qquad (7)$$

Nous donnerons à cette équation le nom de *formule générale de l'équilibre de l'aiguille aimantée soumise à des forces déviatrices quelconques.*

---

28. Déviation partielle produite par un pôle de fer dur d'emplacement quelconque, mais de gisement zéro. — Appelons M la masse magnétique de ce pôle, p sa pente, h son abscisse. Soit C (fig. 16) la projection de ce pôle sur le plan de la rose.

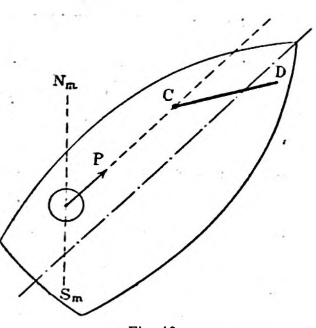


Fig. 16.

Le pôle de fer dur considéré, de masse M, produira sur la rose le même effet déviateur qu'une masse magnétique réduite $M \cos^3 p$ placée en C.

Si nous appelons P la valeur de cette force déviatrice[1], on aura :

$$P = \frac{M \cos^3 p}{h^2}.$$

Nous obtiendrons la valeur de la déviation causée par P à un cap quelconque Z_c en écrivant la formule générale d'équilibre :

$$H \sin \delta = \varphi \sin (Z_c + \omega).$$

Remplaçons dans cette formule

φ par P, ω par zéro.

[1] Pour simplifier la figure, nous ne dessinons ni les deux forces P, ni les deux forces H qui constituent les couples déviateurs et directeurs agissant sur l'aiguille aimantée. Nous supposons que P est une force attractive de la pointe N de l'aiguille.

Il viendra, en appelant δ_1 la déviation :

$$H \sin \delta_1 = P \sin Z_c.$$

Remplaçons $\sin \delta$ par la valeur approchée $\delta \sin 1°$ (δ étant exprimé en degrés), ou

$$\delta \times 0{,}01745, \quad \text{ou} \quad \delta \times \frac{1}{57{,}3}.$$

Il viendra : $$\delta_1 = \frac{57°{,}3\, P \sin Z_c}{H}.$$

Si on pose : $$B_1 = \frac{57°{,}3\, P}{H},$$

il vient : $$\delta_1 = B_1 \sin Z_c.$$

S'il n'y avait à dévier le compas que le pôle unique de fer dur considéré, il serait facile d'avoir expérimentalement B_1.

En effet, si on met le cap à l'Est du compas, on a :

$$\delta_E = B_1.$$

En mettant le cap à l'Ouest, on aura :

$$\delta_O = - B_1.$$

Il suffirait donc de prendre la moyenne des déviations le cap à l'Est et le cap à l'Ouest, cette dernière changée de signe, pour connaître la valeur de B_1.

Ainsi, si on trouve dans le premier cas 12° NE et dans le second 14 NO (les deux nombres pouvant différer un peu l'un de l'autre en valeur absolue à cause des erreurs d'observation), on aura :

$$B_1 = \frac{\delta_E - \delta_O}{2} = \frac{12° - \overline{14}°}{2} = \frac{12° + 14°}{2} = 13°.$$

La loi des déviations sera donc, pour ce compas :

$$\delta_1 = 13° \sin Z_c.$$

29. **Déviation partielle produite par un pôle de fer dur d'emplacement quelconque, mais de gisement 90°.** — En raisonnant comme précédemment, on ramènera la masse magnétique du pôle donné dans le plan de la rose en C′ (fig. 17). Appelant alors δ_2 la déviation produite par

la masse magnétique réduite placée en C′, Q la valeur de la force exercée par cette masse réduite sur l'unité de masse magnétique de l'aiguille aimantée, il suffira dans la formule générale

$$H \sin \delta = \varphi \sin (Z_c + \omega),$$

de remplacer φ par Q et ω par 90°, ce qui donne :

$$H \sin \delta_2 = Q \sin (Z_c + 90°),$$

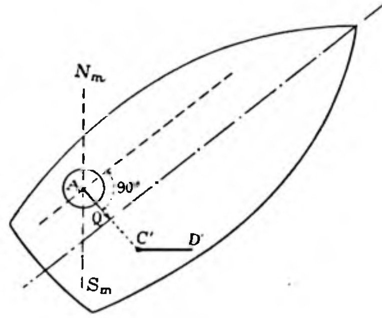


Fig. 17.

ou

$$H \sin \delta_2 = Q \cos Z_c.$$

On tire de là, sans grande erreur :

$$\delta_2 = \frac{57°,3\, Q \cos Z_c}{H},$$

ou

$$\delta_2 = C_1 \cos Z_c,$$

en posant :

$$C_1 = \frac{57°,3\, Q}{H}.$$

Pour obtenir expérimentalement la valeur de C_1, il suffit de mettre le cap au N ou au S. On aura alors :

$$\cos 0° = 1 \quad \text{et} \quad \cos 180° = -1.$$

Par conséquent, C_1 sera la moyenne des déviations observées le cap au N et le cap au S, cette dernière changée de signe.

Si on trouvait, par exemple :

$$\delta_N = 2° \text{ NE}, \quad \delta_S = 3° \text{ NO},$$

on aurait : $C_1 = \frac{2 - \bar{3}}{2} = \frac{2+3}{2} = 2^\circ,5.$

Les formules qui donnent δ_1 et δ_2 montrent que ces déviations changent quand on change de lieu, puisqu'elles sont inversement proportionnelles à H. P et Q ne changent que si on change le chargement.

30. **Déviations semi-circulaires.** — Les formules qui donnent les valeurs de δ_1 et de δ_2 montrent que ces déviations changent de signe quand Z_c varie de 180 degrés. Dans le premier quadrant, la déviation peut d'ailleurs être positive ou négative, suivant que le point C est un pôle Sud ou un pôle Nord. Le signe de la déviation serait également changé dans le premier quadrant si le pôle C de fer dur, au lieu d'être sur l'*N*, était sur l'*Æ* (gisement 180 degrés); car

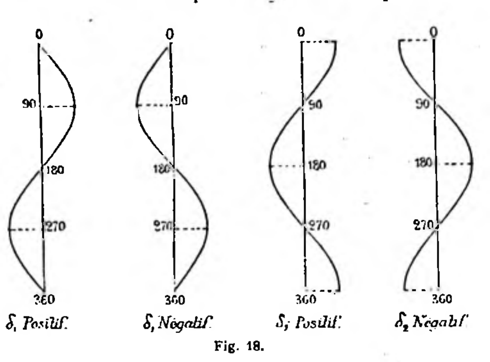


Fig. 18.

$$\sin (Z_c + 180) = - \sin Z_c.$$

Il en serait de même si le pôle C' de fer dur était déplacé de T^d à B^d (gisement 270 degrés); car

$$\sin (Z_c + 270) = - \sin (Z_c + 90^\circ) = - \cos Z_c.$$

Les déviations δ_1 et δ_2, qui changent de signe de 180 en 180 degrés, prennent le nom de *déviations semi-circulaires*.

Les diagrammes de la figure 18 représentent la loi graphique de ces déviations dans tous les quadrants.

Remarque. — On convient, dans les dessins de la figure 18, de dire que les dessins 1 et 3 sont des diagrammes positifs, les dessins 2 et 4 des diagrammes négatifs. Ils sont dits *positifs* quand la déviation est positive lorsque le navire commence à abattre en partant du N pour aller vers l'Est; ils sont dits négatifs quand cette déviation commence à être négative au début de l'abatée.

Le diagramme 1 représente la déviation produite par un pôle S de fer dur placé sur l'avant ou un pôle N placé sur l'arrière.

Le diagramme 2 représente la déviation produite par un pôle N placé sur l'avant ou un pôle S placé sur l'arrière.

Le diagramme 3 représente la déviation produite par un pôle S placé à tribord ou un pôle N placé à bâbord.

Le diagramme 4 représente la déviation produite par un pôle N placé à tribord ou un pôle S placé à bâbord.

31. **Déviation partielle produite par un pôle de fer dur, de gisement quelconque α.** — Soit C'' (fig. 19) la projection du pôle P de masse M.

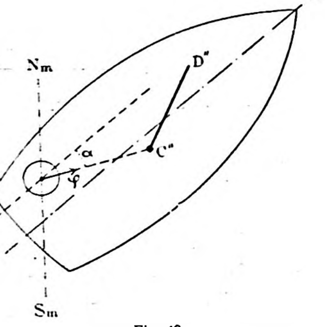


Fig. 19.

La masse réduite m placée en C'' exerce sur l'aiguille une force déviatrice que nous désignerons par φ.

Pour avoir la loi de cette déviation, il suffit de remplacer, dans la formule générale, ω par α et de remarquer que φ est constant et

indépendant du cap, ce qui donne :

$$H \sin \delta = \varphi \sin (Z_c + \alpha),$$

ou approximativement :

$$\delta = \frac{57^\circ,3\, \varphi \sin (Z_c + \alpha)}{H},$$

ou, en développant :

$$\delta = \frac{57^\circ,3\, \varphi \sin Z_c \cos \alpha}{H} + \frac{57^\circ,3\, \varphi \cos Z_c \sin \alpha}{H}.$$

Si on pose : $\varphi \cos \alpha = P$ et $\varphi \sin \alpha = Q$,
on aura :

$$\delta = \frac{57^\circ,3\, P \sin Z_c}{H} + \frac{57^\circ,3\, Q \cos Z_c}{H}.$$

Cette formule peut s'écrire :

$$\delta = B_1 \sin Z_c + C_1 \cos Z_c,$$

en posant :

$$B_1 = \frac{57^\circ,3\, P}{H} \quad \text{et} \quad C_1 = \frac{57^\circ,3\, Q}{H}.$$

Finalement, on voit qu'un pôle de fer dur C'', de gisement quelconque α, produit la même déviation que deux pôles de fer dur, l'un C, placé sur l'avant, causant la déviation δ_1, l'autre C', placé par le travers, causant la déviation δ_2.

La déviation totale

$$\delta = \frac{57^\circ,3\, \varphi \sin (Z_c + \alpha)}{H}$$

est encore une déviation *semi-circulaire;* mais cette déviation n'a pas ses zéros et ses maxima aux points cardinaux.

En effet, δ est nul pour

$$Z_c + \alpha = 0 \quad \text{et pour} \quad Z_c + \alpha = 180^\circ,$$

c'est-à-dire pour

$$Z_c = -\alpha \quad \text{et} \quad Z_c = 180^\circ - \alpha.$$

En général, on ne peut, par le calcul, déterminer B_1 et C_1, car on ignore l'emplacement exact des pôles de fer dur et la valeur de leurs masses magnétiques; mais on peut trouver par l'expérience les valeurs de B_1 et de C_1 dans le cas considéré.

En effet, si on met le cap au N du compas, on a :

$$\sin Z_c = 0, \quad \cos Z_c = 1.$$

Donc $$\delta_N = C_1.$$

Si on met le cap au S du compas, on a :

$$\sin Z_c = 0, \quad \cos Z_c = -1.$$

Donc $$-\delta_S = C_1.$$

En mettant le cap à l'E, on a :

$$\sin Z_c = 1, \quad \cos Z_c = 0.$$

Donc $$\delta_E = B_1.$$

En mettant le cap à l'O, on a :

$$\sin Z_c = -1, \quad \cos Z_c = 0.$$

Donc $$-\delta_O = B_1.$$

Si on veut plus d'exactitude pour compenser les erreurs d'observation, on aura :

$$B_1 = \frac{\delta_E - \delta_O}{2} \quad \text{et} \quad C_1 = \frac{\delta_N - \delta_S}{2}.$$

32. **Déviation partielle produite par un nombre quelconque de pôles de fer dur répartis dans le navire en des endroits quelconques.** — Tous ces pôles de fer dur ont des emplacements fixes dans le navire et des masses magnétiques invariables, ces masses étant indépendantes du cap du navire et de la latitude magnétique.

Remplaçons toutes ces masses magnétiques par les masses magnétiques *réduites* équivalentes situées dans le plan de la rose.

Ces masses réduites exerceront sur chacun des pôles de l'aiguille des forces égales et de sens contraires :

$$(\varphi_1, -\varphi_1), \quad (\varphi_2, -\varphi_2), \quad \text{etc.}$$

Si on compose, d'après la règle du *polygone des forces*, les forces φ_1, φ_2, φ_3, etc., d'une part, et les forces $-\varphi_1$, $-\varphi_2$, $-\varphi_3$ d'autre part, on aura deux résultantes égales et de directions opposées que nous désignerons par

$$\Phi \quad \text{et} \quad -\Phi,$$

ces forces ayant un gisement bien déterminé que nous désignerons par α.

On aura donc, comme dans le cas d'une force unique produite par un seul pôle de fer dur :

$$\delta = \frac{57^{\circ},3\,\Phi \sin(Z_c + \alpha)}{H},$$

ou $$\delta = \frac{57^{\circ},3\,\Phi \cos\alpha \sin Z_c}{H} + \frac{57^{\circ},3\,\Phi \sin\alpha \cos Z_c}{H},$$

qu'on peut mettre sous la forme

$$\delta = B_1 \sin Z_c + C_1 \cos Z_c.$$

On déterminerait B_1 et C_1 expérimentalement en suivant exactement la marche indiquée au paragraphe qui précède, pourvu qu'il n'y ait que ces fers à dévier les compas.

33. **Déviation partielle produite par un pôle P de *fer doux vertical*, de gisement zéro.** — Supposons-nous, pour fixer les idées, dans l'hémisphère N magnétique, et supposons que le point V (fig.20) représente la projection du pôle supérieur P de la barre de fer doux verticale considérée. Ce pôle, de gisement zéro, par hypothèse, sera un pôle Sud. Il agira par attraction sur la pointe N de l'aiguille aimantée : soit φ la valeur de cette attraction.

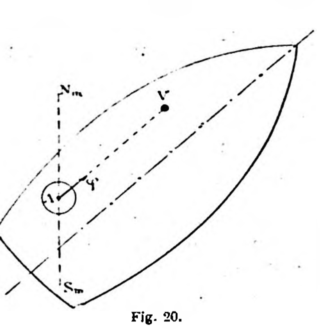


Fig. 20.

Nous pouvons représenter la valeur de φ par une expression de la forme

$$\varphi = c\,\mathrm{H}\,\mathrm{tg}\,\theta.$$

En effet, nous avons vu que la masse magnétique d'un pôle de fer doux vertical peut être représentée, en valeur absolue, par une expression de la forme

$$k\mathrm{SH}\,\mathrm{tg}\,\theta.$$

Si p est la pente du pôle considéré, h son abscisse, la *masse réduite* de ce pôle aura pour valeur :

$$k\mathrm{SH}\,\mathrm{tg}\,\theta\cos^3 p.$$

Cette masse magnétique réduite exercera sur l'unité de

masse magnétique du pôle N de l'aiguille aimantée une attraction égale à

$$\frac{k\mathrm{SH}\ \mathrm{tg}\,\theta \cos^3 p}{h^2};$$

qu'on peut mettre sous la forme

$$c\,\mathrm{H}\ \mathrm{tg}\,\theta.$$

Remplaçons, dans la formule générale

$$\mathrm{H} \sin \delta = \varphi \sin (\mathrm{Z}_c + \omega),$$

φ par $c\mathrm{H}\ \mathrm{tg}\,\theta$ et ω par zéro. Il viendra :

$$\mathrm{H} \sin \delta_3 = c\,\mathrm{H}\ \mathrm{tg}\,\theta \sin \mathrm{Z}_c;$$

d'où on tire approximativement :

$$\delta_3 = 57{,}3\, c\ \mathrm{tg}\,\theta \sin \mathrm{Z}_c,$$

ou $\delta_3 = \mathrm{B}_2 \sin \mathrm{Z}_c,$

en posant : $\mathrm{B}_2 = 57{,}3\, c\ \mathrm{tg}\,\theta.$

La formule $\delta_3 = 57^\circ{,}3\, c\ \mathrm{tg}\,\theta \sin \mathrm{Z}_c$

montre que la déviation produite par le fer doux vertical est encore une déviation *semi-circulaire*. Cette déviation est, dans un même lieu, proportionnelle au sinus du cap. Si on change de lieu, pour un même cap les *déviations sont directement proportionnelles aux tangentes de l'inclinaison.* Quand on franchit l'équateur magnétique, θ et tg θ changent de signes, la déviation change de sens.

A l'équateur magnétique, θ et tg θ sont nulles, la déviation est nulle à tous les caps. Ceci est d'ailleurs évident, puisque à l'équateur magnétique le fer doux vertical est désaimanté. Il ne peut donc dévier le compas.

34. **Déviation partielle produite par l'un des pôles d'une barre de fer doux verticale** (fig. 21), **placée à tribord de la rose.** — En raisonnant comme au paragraphe qui précède, on remplacera, dans la formule générale, ω par 90 degrés, et φ par $f\mathrm{H}\ \mathrm{tg}\,\theta$, ce qui donnera :

$$\mathrm{H} \sin \delta_4 = f\mathrm{H}\ \mathrm{tg}\,\theta \sin (\mathrm{Z}_c + 90^\circ)$$

ou $$\delta_4 = 57^\circ,3 f \operatorname{tg} \theta \cos Z_c ; \qquad (14)$$

ce qui peut s'écrire :

$$\delta_4 = C_2 \cos Z_c,$$

en posant : $C_2 = 57^\circ,3 f \operatorname{tg} \theta.$

Cette barre de fer produirait une déviation *semi-circulaire*, proportionnelle au cosinus du cap.

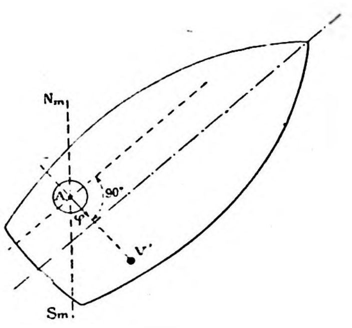


Fig. 21.

Dans la pratique, cette déviation est très faible, sinon nulle, car on évite de placer une manche à vent par le travers du compas ou, réciproquement, d'établir le compas par le travers d'une cheminée, d'un mât, etc.

Les déviations produites par les points V et V' seraient représentées graphiquement par des diagrammes semblables à ceux de la figure 18.

35. **Déviation partielle produite par l'un des pôles d'une barre de fer doux verticale** (fig. 22) **de gisement quelconque** β. — En raisonnant comme précédemment, on remplacera, dans la formule générale, ω par sa valeur spéciale β, et φ par kH tg θ, ce qui donnera :

$$H \sin \delta = kH \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \beta),$$

ou, approximativement :

$$\delta = 57^\circ,3\, k \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \beta),$$

ou $$\delta = 57^\circ,3\, k \operatorname{tg} \theta \sin Z_c \cos \beta + 57^\circ,3\, k \operatorname{tg} \theta \cos Z_c \sin \beta,$$

ou $$\delta = 57^\circ,3\, c \operatorname{tg} \theta \sin Z_c + 57^\circ,3\, f \operatorname{tg} \theta \cos Z_c, \qquad (15)$$

en posant : $k \cos \beta = c$ et $k \sin \beta = f$. On voit donc que la barre V″, de gisement quelconque β, produit le même effet que deux barres de fer doux verticales, placées, l'une V,

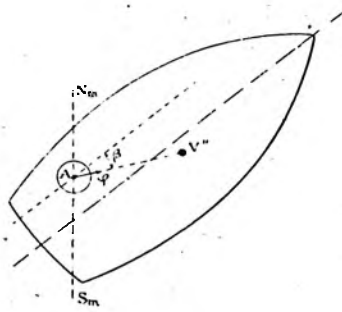


Fig. 22.

dans un plan parallèle au longitudinal par rapport au compas, l'autre V′, transversalement au compas.

En employant les abréviations déjà connues, on aurait :

$$\delta = B_2 \sin Z_c + C_2 \cos Z_c .$$

36. **Déviation partielle produite par l'ensemble de tous les fers doux verticaux du navire.** — Tous les pôles de fer doux verticaux ont, dans le navire, des emplacements fixes et des masses magnétiques invariables tant qu'on ne change pas de latitude magnétique.

On peut remplacer ces masses magnétiques réparties dans le navire à des emplacements quelconques par les masses *réduites* qui leur sont équivalentes, toutes ces masses réduites étant désormais dans le plan de la rose. Si on compose toutes les forces horizontales qui, émanant de ces masses réduites, agissent sur l'un des pôles de l'aiguille aimantée, on obtiendra une résultante bien déterminée Φ, ayant un gisement bien déterminé β. Cette résultante sera de la forme $\Phi = kH \operatorname{tg} \theta$.

L'aiguille aimantée se trouvera en équilibre, avec une déviation δ, sous l'action des deux couples :

$$(H, -H) \quad \text{et} \quad (\Phi, -\Phi).$$

Par conséquent, l'équation d'équilibre aura, comme dans le cas d'un seul pôle de fer doux vertical, la forme

$$H \sin \delta = kH \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \beta),$$

qui pourra, en simplifiant, se mettre sous la forme

$$\delta = 57^\circ{,}3\, c \operatorname{tg} \theta \sin Z_c + 57^\circ{,}3\, f \operatorname{tg} \theta \cos Z_c,$$

ou encore

$$\delta = B_2 \sin Z_c + C_2 \cos Z_c.$$

Cette formule a, en apparence, la même forme que la formule $\delta = B_1 \sin Z_c + C_1 \cos Z_c$

établie dans le cas du fer dur.

Mais, alors que, dans ce dernier cas, les coefficients B_1, C_1 sont invariables, les coefficients B_2, C_2 relatifs au fer doux vertical, invariables dans un lieu donné, changent de valeurs quand on change de latitude magnétique. Ils deviennent *nuls* à l'équateur magnétique et changent de signe quand on franchit l'équateur magnétique, puisqu'on a :

$$B_2 = 57^\circ{,}3\, k \cos \beta \operatorname{tg} \theta \quad \text{et} \quad C_2 = 57^\circ{,}3\, k \sin \beta \operatorname{tg} \theta,$$

ou $B_2 = 57^\circ{,}3\, c \operatorname{tg} \theta$ et $C_2 = 57^\circ{,}3\, f \operatorname{tg} \theta$.

37. Déviation partielle produite par l'un des pôles P d'une barre de fer doux horizontale (fig. 23) **passant par la verticale du centre de la rose (fer rayonnant).** — Appelons γ le gisement du pôle P. Ce gisement est ici égal à l'orientation de la barre PP', dont l'inclinaison est nulle.

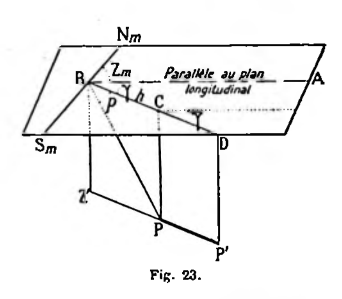


Fig. 23.

Si nous appelons Z_m le cap magnétique du navire, le champ terrestre produit, par induction, en P, une masse magnétique égale à

$$-kSH\cos(Z_m+\gamma).$$

Si on appelle p la pente du pôle P, cette masse magnétique peut être remplacée par une masse magnétique *réduite* équivalente, placée en C et ayant pour valeur :

$$-kSH\cos(Z_m+\gamma)\cos^3 p.$$

Cette masse magnétique, distante du centre R de la rose d'une quantité $RC = h$, exerce sur l'unité de masse magnétique de l'aiguille aimantée une force φ'' ayant pour valeur :

$$\varphi'' = -\frac{kSH\cos(Z_m+\gamma)\cos^3 p}{h^2},$$

qu'on peut écrire :

$$\varphi'' = mH\cos(Z_m+\gamma),$$

en posant :

$$m = -\frac{kS}{h^2}\cos^3 p,$$

m désignant ici, non une masse magnétique, mais un coefficient numérique comme 0,15, 0,25... par exemple.

Remplaçons, dans la formule générale

$$H \sin \delta = \varphi \sin (Z + \omega),$$

φ par sa valeur $m H \cos (Z_m + \gamma)$, et ω par sa désignation spéciale γ. Il viendra :

$$H \sin \delta = m H \cos (Z_m + \gamma) \sin (Z_c + \gamma),$$

ou $$\sin \delta = m \cos (Z_m + \gamma) \sin (Z_c + \gamma).$$

Remarquons qu'à cause de la relation

$$Z_m = Z_c + \delta,$$

l'inconnue δ entre au second membre.

Pour dégager δ, nous développerons le sinus de

$$(Z_m + \gamma) \quad \text{ou de} \quad [(Z_c + \gamma) + \delta],$$

ce qui donnera :

$$\sin \delta = m \cos (Z_c + \gamma + \delta) \cos \delta \sin (Z_c + \gamma),$$

ou $$\sin \delta = \begin{cases} \;\; m \cos (Z_c + \gamma) \cos \delta \sin (Z_c + \gamma) \\ - m \sin (Z_c + \gamma) \sin \delta \sin (Z_c + \gamma), \end{cases}$$

ou $$\sin \delta = \frac{m}{2} \sin (2Z_c + 2\gamma) \cos \delta - m \sin^2 (Z_c + \gamma) \sin \delta ;$$

d'où $$\operatorname{tg} \delta = \frac{m \sin (2Z_c + 2\gamma)}{2[1 + m \sin^2 (Z_c + \gamma)]}. \qquad (17)$$

Telle est la formule rigoureuse, mais peu commode en pratique, qui fait connaître δ en fonction du cap Z_c.

On peut simplifier ce résultat en remplaçant $\operatorname{tg} \delta$ par $\delta \sin 1°$ et en substituant au binôme $1 + m \sin^2 (Z_c + \gamma)$, variable avec le cap, sa *valeur moyenne* pour tous les caps, ce qui change assez peu le résultat, tant que la déviation ne dépasse pas une dizaine de degrés.

Cette moyenne a pour valeur : $1 + \frac{m}{2}$.

En effet, la quantité $\sin^2 (Z_c + \gamma)$ peut se mettre sous la forme

$$\sin^2 (Z_c + \gamma) = \frac{1 - \cos (2 Z_c + 2\gamma)}{2}.$$

Il est alors évident que, si Z_c varie de 0° à 360°, $2Z_c + 2\gamma$ variera entre 2γ et $720° + 2\gamma$.

A toute valeur positive du cosinus en correspondra une autre négative et de même valeur absolue. Donc la moyenne des valeurs de $\cos(2Z_c + 2\gamma)$ est nulle, et la moyenne des valeurs de $\sin^2(Z_c + \gamma)$ est égale à $\frac{1}{2}$.

On a donc finalement[1] sans grande erreur :

$$\delta_5 = \frac{57°,3\, m \sin(2Z_c + 2\gamma)}{2\left(1 + \frac{m}{2}\right)},$$

ou

$$\delta_5 = \frac{57°,3\, m \sin(2Z_c + 2\gamma)}{2\lambda}, \quad (18)$$

en posant :

$$\lambda = 1 + \frac{m}{2}.$$

38. Force moyenne vers le Nord, λH. — On appelle souvent, dans les traités relatifs aux compas, force moyenne vers le Nord, la quantité λH.

En voici la raison : la force φ'', émanant de la barre de fer doux horizontale précitée, peut se décomposer en deux forces : l'une vers le Nord magnétique, l'autre vers l'Est. La force φ'' a pour valeur :

$$\varphi'' = mH \cos(Z_m + \gamma).$$

Sa composante vers le N aura pour valeur :

$$\varphi'' \cos(Z_m + \gamma) = mH \cos(Z_m + \gamma) \times \cos(Z_m + \gamma),$$

ou

$$mH \cos^2(Z_m + \gamma).$$

La force vers le N, f_n, agissant sur l'aiguille, se compose donc de la force horizontale H augmentée de la composante vers le N

$$mH \cos^2(Z_m + \gamma)$$

émanant du fer doux horizontal. On a donc :

$$f_n = H + mH \cos^2(Z_m + \gamma),$$

[1] En calculant les valeurs de δ_5 par les formules (17) ou (18), on trouve de petites différences qui ne dépassent guère 1 degré tant que δ_5 reste inférieur à une dizaine de degrés.

ou encore :

$$f_n = H\left[1 + m\cos^2(Z_m + \gamma)\right],$$

ou

$$f_n = H\left[1 + m \times \frac{1 + \cos(2Z_m + 2\gamma)}{2}\right].$$

En raisonnant comme précédemment, on voit que la moyenne des valeurs de $\cos(2Z_m + 2\gamma)$ est nulle pour des caps équidistants de 0° à 360°. Donc la *valeur moyenne* de f_n est :

$$f_n = H\left(1 + \frac{m}{2}\right) = \lambda H.$$

La valeur moyenne de f_n dépend donc de la valeur de m. Les barres de fer doux rayonnantes qui ne traversent pas le compas ont un m positif et augmentent la force vers le Nord ; celles qui traversent le compas ont un m négatif. C'est le cas le plus habituel. Ainsi les baux en fer qui vont de tribord à bâbord tendent à diminuer la force moyenne vers le Nord.

L'expérience montre que λ varie généralement entre 0,85 et 0,95. Sa valeur la plus habituelle est voisine de 0,90. En d'autres termes, le fer doux horizontal diminue, *en moyenne*, de $\frac{1}{10}$ la force vers le Nord du champ terrestre. Si nous admettons que λ ait pour valeur 0,9, on en conclura que $m = -0{,}2$ en moyenne. En d'autres termes, la force maxima déviatrice due au fer doux est, dans notre hypothèse, le $\frac{1}{5}$ de la force directrice H de l'aiguille aimantée.

39. Discussion sommaire de la formule

$$\delta_5 = \frac{57^\circ{,}3\, m \sin(2Z_c + 2\gamma)}{2\lambda}. \qquad (18)$$

La déviation indiquée par cette formule est dite une déviation *quadrantale*.

En effet, δ_5 est nul pour $2Z_c + 2\gamma = 0$, c'est-à-dire pour $Z_c = -\gamma$. Quand Z_c croît, si on suppose m positif,

δ_5 augmente et atteint un maximum pour $2Z_c + 2\gamma = 90°$, c'est-à-dire pour $Z_c = 45° - \gamma$.

Z_c continuant à augmenter, δ_5 diminue et redevient nul pour $2Z_c + 2\gamma = 180°$, c'est-à-dire pour $Z_c = 90 - \gamma$.

Quand Z_c augmente encore, δ_5 change de signe. En continuant ainsi à faire varier Z_c, on trouve finalement que δ_5 passe par les valeurs suivantes :

VALEURS DE Z_c	VALEURS DE δ_5
$-\gamma$	zéro.
$45 - \gamma$	maximum positif.
$90 - \gamma$	zéro.
$135 - \gamma$	maximum négatif.
$180 - \gamma$	zéro.
$225 - \gamma$	maximum positif.
$270 - \gamma$	zéro.
$315 - \gamma$	maximum négatif.
$360 - \gamma$	zéro.

En d'autres termes, δ_5 change de signe chaque fois que Z_c varie de 90 degrés.

Si on désigne par Δ le maximum ou le minimum de δ_5 en valeur absolue, on aura, pour $\sin(2Z_c + 2\gamma) = \pm 1$:

$$\Delta = \frac{57°,3\, m}{2\lambda}. \tag{19}$$

On peut développer la valeur de δ_5, ce qui donne :

$$\delta_5 = \frac{57°,3\, m \sin 2Z_c \cos 2\gamma}{2\lambda} + \frac{57°,3\, m \cos 2Z_c \sin 2\gamma}{2\lambda},$$

et écrire pour abréger :

$$\delta_5 = \mathrm{D} \sin 2Z_c + \mathrm{E} \cos 2Z_c,$$

en posant :

$$\frac{57°,3\, m \cos 2\gamma}{2\lambda} = \mathrm{D}. \tag{20}$$

$$\frac{57°,3\, m \sin 2\gamma}{2\lambda} = \mathrm{E}. \tag{21}$$

Si on examine chacun des termes du second membre, on constate que chacun d'eux représente une déviation

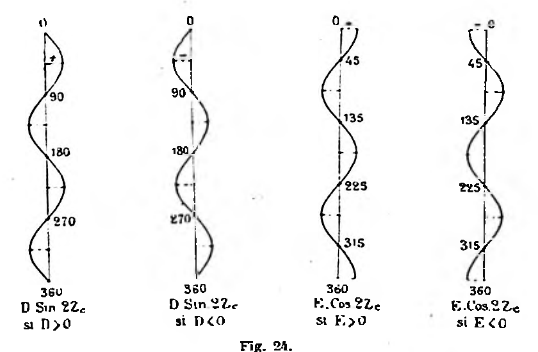


Fig. 24.

quadrantale représentée par le diagramme ci-dessus (fig. 24).

40. **Relation entre Δ, D, E.** — Si on divise membre à membre les égalités :

$$\frac{57°,3m \cos 2\gamma}{2\lambda} = D, \tag{20}$$

et

$$\frac{57°,3m \sin 2\gamma}{2\lambda} = E, \tag{21}$$

il vient :

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{E}{D}. \tag{22}$$

D'autre part, si on élève ces mêmes égalités au carré, il vient, en les ajoutant après élévation :

$$D^2 + E^2 = \frac{57°,3^2 m^2 \cos^2 2\gamma}{4\lambda^2} + \frac{57°,3^2 m^2 \sin^2 2\gamma}{4\lambda^2},$$

ou encore :

$$D^2 + E^2 = \frac{57°,3^2 m^2}{4\lambda^2} (\cos^2 2\gamma + \sin^2 2\gamma),$$

ou $$D^2 + E^2 = \frac{57°,3^2 m^2}{4\lambda^2} = \left(\frac{57°,3m}{2\lambda}\right)^2.$$

Mais on a trouvé :

$$\Delta = \frac{57^{\circ},3m}{2\lambda}.$$

On a donc : $D^2 + E^2 = \Delta^2,$

ou

$$\Delta = \sqrt{D^2 + E^2}. \qquad (23)$$

Δ représente le *pouvoir déviateur maximum* du fer doux horizontal.

41. *Remarques.* — Il n'est pas inutile de remarquer que, dans la formule qui donne δ_5, H a disparu ; θ n'y figure pas non plus. Donc : *la déviation produite, à un cap donné, par le fer doux horizontal est constante à ce cap, quand on change de lieu,* puisque les variations de H et de θ ne font pas varier δ_5.

Si dans la formule 18 on remplace successivement γ par zéro et par 45 degrés, on obtient :

$$\delta' = \frac{57^{\circ},3m \sin 2Z_c}{2\lambda},$$

et

$$\delta'' = \frac{57^{\circ},3m \cos 2Z_c}{2\lambda},$$

ce qui montre qu'une barre de fer doux rayonnante de gisement quelconque γ produit le même effet que deux barres rayonnantes, l'une de gisement zéro, l'autre de gisement 45 degrés[1].

42. **Déviation partielle produite par l'un des pôles d'une barre de fer doux horizontale, ce pôle ayant un gisement γ et la barre une orientation ψ (fig. 25).** — Comme dans le cas précédent, la force déviatrice produite par ce pôle pourra être représentée par

$$m \, H \cos (Z_m + \psi),$$

[1] Il serait inexact de penser qu'une barre rayonnante de gisement γ pourrait être remplacée par une barre longitudinale et une barre transversale. En effet, supposons qu'on ait le cap au N magnétique. La barre rayonnante de gisement γ dévie le compas. La barre longitudinale n'a aucune action. La barre transversale étant EO est désaimantée.

et la formule d'équilibre deviendra :

$$H \sin \delta = m H \cos (Z_m + \psi) \sin (Z_e + \gamma).$$

Remplaçant Z_m par $Z_e + \delta$ et divisant par H, il vient :

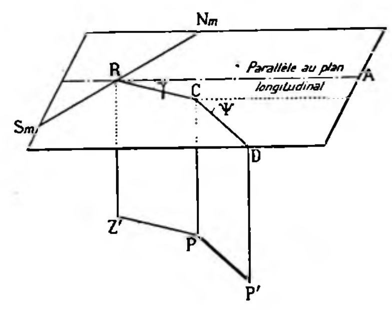


Fig. 25.

$$\sin \delta = m \cos (Z_e + \psi + \delta) \sin (Z_e + \gamma),$$

ou

$$\sin \delta = m \cos (Z_e + \psi) \sin (Z_e + \gamma) \cos \delta$$
$$- m \sin (Z_e + \psi) \sin (Z_e + \psi) \sin \delta ;$$

d'où

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{m \cos (Z_e + \psi) \sin (Z_e + \gamma)}{1 + m \sin (Z_e + \psi) \sin (Z_e + \gamma)} .$$

Le dénominateur peut s'écrire :

$$1 + m \left[\frac{\cos (\gamma - \psi)}{2} - \frac{\cos (2Z_e + \gamma + \psi)}{2} \right].$$

La valeur moyenne du dénominateur, quand Z_e varie de 0° à 360°, est :

$$1 + \frac{m \cos (\gamma - \psi)}{2} .$$

En représentant ce binôme par λ, on aura sensiblement :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{m \cos (Z_e + \psi) \sin (Z_e + \gamma)}{\lambda},$$

ou sensiblement :

$$\delta = \frac{57°,3 m \cos (Z_e + \psi) \sin (Z_e + \gamma)}{\lambda}. \quad (24)$$

Il est facile de voir que la déviation ainsi produite peut,

par une fiction, être considérée comme composée d'une *déviation constante* et d'une déviation quadrantale produite par une barre de fer doux *rayonnante* de gisement

$$\gamma_m = \frac{\gamma + \psi}{2}.$$

En effet, la formule (24) peut s'écrire :

$$\delta = \frac{57°,3m\left[\sin(2Z_c + \gamma + \psi) + \sin(\gamma - \psi)\right]}{2\lambda},$$

ou $$\delta = \frac{57°,3m \sin(2Z_c + 2\gamma_m)}{2\lambda} + \frac{57°,3m \sin(\gamma - \psi)}{2\lambda}.$$

Le second terme du second membre représente une déviation *constante*, le premier une déviation quadrantale analogue à celle que produirait une barre *rayonnante* de gisement

$$\gamma_m = \frac{\gamma + \psi}{2}.$$

Remarque. — Si on applique cette formule à une barre de fer doux horizontale n'occupant que la demi-largeur du navire à tribord, le compas étant placé dans le plan longitudinal sur l'arrière de cette barre, la formule établie ci-dessus donne (en supposant négligeable l'effet du pôle placé en abord), puisque $\gamma = 0$ et $\psi = 90°$:

$$\delta = \frac{57°,3m \cos(Z_c + 90°) \sin Z_c}{\lambda},$$

ou $$\delta = -\frac{57°,3m \sin Z_c \times \sin Z_c}{\lambda} = -\frac{57°,3m \sin^2 Z_c}{\lambda},$$

ce qui représente une déviation constamment négative, mais nulle pour $Z_c = 0$ et $Z_c = 180°$.

Ce résultat est, en apparence, contradictoire avec ce fait qu'en général le fer doux horizontal produit une déviation quadrantale. Mais l'égalité $\delta = -\frac{57°,3m \sin^2 Z_c}{\lambda}$ peut s'écrire :

$$\delta = -\frac{57°,3m}{\lambda}\left(\frac{1 - \cos 2Z_c}{2}\right)$$
$$= -\frac{57°,3m}{2\lambda} + \frac{57°,3m \cos 2Z_c}{2}.$$

La déviation δ se compose sous cette forme d'une déviation *constante* et d'une déviation *quadrantale.*

43. Déviation partielle produite par l'un des pôles d'une barre de fer doux, ce pôle ayant un gisement γ, la barre ayant une orientation ψ et une inclinaison I. —

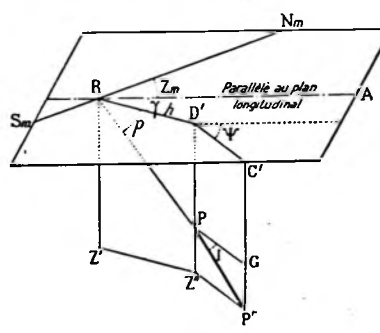


Fig. 26.

Nous avons vu, au début de cet ouvrage, que la masse magnétique d'un pôle P (fig. 26) d'une barre de fer doux oblique à tous les plans principaux du navire a pour valeur :

$$k\text{SH} \operatorname{tg} \theta \sin \text{I} + k\text{SH} \cos \text{I} \cos (\text{Z}_m + \psi).$$

On peut, au point de vue de ses effets, remplacer cette masse magnétique placée en P par une masse *réduite* placée en D', pourvu qu'on introduise le facteur réducteur $\cos^3 p$.

En divisant le résultat par h^2, on aurait la valeur de la force déviatrice produite par cette masse réduite, ce qui donne finalement une expression de la forme

$$k_1 \text{H} \operatorname{tg} \theta + m \text{H} \cos (\text{Z}_m + \psi).$$

Il suffit donc maintenant de remplacer, dans la formule d'équilibre

$$\text{H} \sin \delta = \varphi \sin (\text{Z}_c + \omega),$$

la force φ par la valeur qui précède et ω par sa valeur actuellement désignée par γ, ce qui donne :

$$\begin{aligned} H \sin \delta = & kH \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \gamma) \\ & + m H \cos (Z_m + \psi) \sin (Z_c + \gamma); \end{aligned}$$

ou

$$\begin{aligned} \sin \delta = & k \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \gamma) \\ & + m \cos (Z_m + \psi) \sin (Z_c + \gamma), \end{aligned}$$

ou, à peu de chose près :

$$\begin{aligned} \delta = & 57^\circ,3\, k \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \gamma) \\ & + 57^\circ,3\, m \cos (Z_m + \psi) \sin (Z_c + \gamma). \end{aligned}$$

La première partie du second membre représente une déviation

$$\delta' = 57^\circ,3\, k \operatorname{tg} \theta \sin (Z_c + \gamma),$$

produite par une barre de fer doux *verticale* de gisement γ.

La seconde partie :

$$\delta'' = 57^\circ,3\, m \cos (Z_m + \psi) \sin (Z_c + \gamma),$$

représente la valeur de la déviation produite par une barre *horizontale* dont le pôle considéré a pour gisement γ, la barre horizontale ayant l'orientation ψ.

---

44. Déviation totale produite par l'ensemble des fers durs et des fers doux du navire. — Nous avons, dans les paragraphes qui précèdent, étudié les déviations produites séparément par les différents fers du bord. Nous

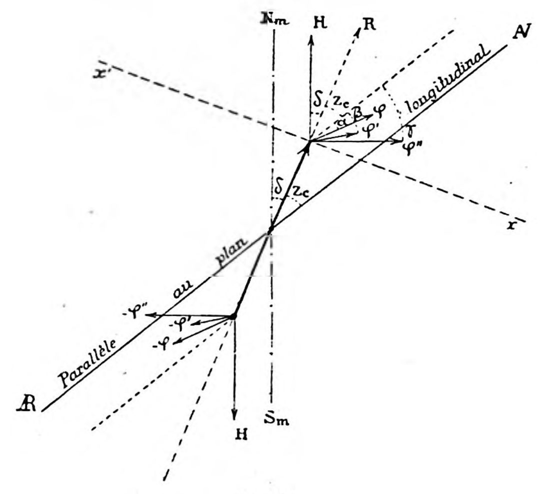


Fig. 27.

allons montrer que la déviation totale produite par l'ensemble de tous ces fers est égale à la somme des seconds membres des valeurs des déviations partielles $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$, pourvu que Z_c (fig. 27) représente dans la formule finale le cap au compas résultant de toutes les déviations réunies.

Nous avons trouvé que la déviation produite par des pôles quelconques de fer doux est donnée par la formule

$$\delta_1 + \delta_2 = B_1 \sin Z_c + C_1 \cos Z_c,$$

que la déviation produite par le fer doux vertical a pour valeur :

$$\delta_3 + \delta_4 = B_2 \sin Z_c + C_2 \cos Z_c,$$

que la déviation produite par une barre de fer doux horizontal rayonnant a pour valeur :

$$\delta_5 = D \sin 2Z_c + E \cos 2Z_c .$$

Nous avons vu de plus, au paragraphe 43, que les barres de fer doux obliques à tous les plans principaux du navire peuvent se remplacer par une barre de fer doux verticale et par une barre de fer doux horizontale de même orientation que la barre donnée.

Si toutes les causes déviatrices travaillent ensemble, on aura la *déviation totale* δ, en ajoutant ensemble les seconds membres des équations qui précèdent et en *admettant*, ce qui n'est pas évident, que Z_c représente alors le cap au compas fourni par l'égalité

$$Z_c + \delta = Z_m.$$

Comme, en plus des déviations dont nous venons de parler, les fers doux obliques à tous les plans principaux du navire introduisent une déviation constante et qu'enfin il peut y avoir une erreur de la ligne de foi introduisant une autre déviation constante, on peut dire que la déviation totale à un cap Z_c est donnée par la formule suivante, énoncée, pour la première fois, par Archibald Smith :

$$\delta = A + B \sin Z_c + C \cos Z_c + D \sin 2Z_c + E \cos 2Z_c.$$

Si on ne veut pas se contenter du raisonnement sommaire que nous venons de faire, il faut recourir à l'équation générale d'équilibre dans le cas d'un nombre quelconque de forces déviatrices. C'est ce que nous allons faire présentement.

45*. Démonstration complète de la formule exacte donnant la déviation totale. — Nous savons que l'aiguille aimantée placée sur un navire est soumise :

1° Au couple *directeur terrestre* (H, — H);

2° A un certain nombre de couples

$$(\varphi_1, -\varphi_1), \quad (\varphi_2, -\varphi_2), \text{ etc.},$$

engendrés par tous les pôles de *fer dur* répartis dans le navire;

3° Aux couples :

$$(\varphi'_1, -\varphi'_1), \quad (\varphi'_2, -\varphi'_2), \text{ etc.},$$

engendrés par les pôles de *fer doux* vertical répartis dans le navire;

4° Aux couples engendrés par les pôles des barres de fer doux *horizontales* rayonnantes ou non ;

5° Aux couples engendrés par les pôles des barres de fer doux *obliques* aux plans principaux du navire.

Nous avons vu que les masses magnétiques des pôles de ces derniers fers peuvent être remplacées par les masses magnétiques de barres *verticales* et *horizontales*.

Nous supposerons que ce remplacement ait été fait conformément aux formules établies au début de cet ouvrage, et nous supposerons que les masses magnétiques fictives ainsi trouvées soient rangées dans les catégories 3 et 4.

Supposons enfin que toutes les masses magnétiques pouvant dévier l'aiguille aimantée ont été ramenées dans le plan de la rose et remplacées par les masses réduites équivalentes.

Ceci posé, on peut toujours, en suivant la règle du polygone des forces, chercher la résultante de toutes les forces φ émanant du fer dur. On aura ainsi une résultante Φ bien déterminée en grandeur, ayant un gisement également bien déterminé α.

On pourra pareillement chercher la résultante Φ' des forces φ' émanant des pôles de fer doux vertical.

Cette résultante, de valeur constante dans un lieu donné,

aura un gisement bien déterminé β. Elle sera de la forme $kH \operatorname{tg} \theta$.

Il est inutile de chercher la résultante des forces émanant du fer doux horizontal, ces forces étant variables avec le cap du navire. Elles ont bien un gisement invariable, mais leur grandeur change avec le cap, et ces valeurs ne sont pas proportionnelles pour deux caps successifs. On ne saurait donc, en les combinant d'après la règle du polygone des forces, obtenir une résultante de grandeur et de gisement bien déterminés et invariables comme dans les cas qui précèdent.

L'une, φ''_1, de ces forces est de la forme

$$mH \cos(Z_m + \psi).$$

Nous laisserons en évidence sans les combiner les forces de cette nature.

Ceci posé, nous savons que l'équation générale d'équilibre de l'aiguille aimantée soumise à un nombre quelconque de couples déviateurs est de la forme

$$H \sin \delta = \varphi \sin(Z_c + \alpha) + \varphi' \sin(Z_c + \beta) + \varphi'' \sin(Z_c + \gamma).$$

Dans le cas actuel, nous aurons :

$$H \sin \delta = \begin{cases} \Phi \sin(Z_c + \alpha) \\ + \Phi' \sin(Z_c + \beta) \\ + \varphi''_1 \sin(Z_c + \gamma_1) + \varphi''_2 \sin(Z_c + \gamma_2) + \varphi''_3 \sin(Z_c + \gamma_3) + \dots, \end{cases}$$

γ_1, γ_2, γ_3, etc., représentant les gisements des différents pôles des barres de fer doux considérées.

Pour abréger, nous écrirons :

$$H \sin \delta = \Phi \sin(Z_c + \alpha) + \Phi' \sin(Z_c + \beta) + \sum \varphi'' \sin(Z_c + \gamma).$$

Ceci posé, remplaçons Φ' par sa valeur $kH \operatorname{tg} \theta$ et chaque force φ''_1, φ''_2, φ''_3, etc., par les valeurs connues

$$m_1 H \cos(Z_m + \psi_1), \qquad m_2 H \cos(Z_m + \psi_2), \text{ etc.}$$

L'équation d'équilibre deviendra :

$$H \sin \delta = \begin{cases} \Phi \sin(Z_c + \alpha) \\ + \Phi' \sin(Z_c + \beta) \\ + \sum mH \cos(Z_m + \psi) \sin(Z_c + \gamma). \end{cases}$$

Cette égalité représente l'équation fondamentale de l'équilibre de l'aiguille aimantée soumise à des forces émanant de fers de natures et d'emplacements quelconques.

Développons les deux premiers termes et remplaçons Φ par $k\text{H}\,\text{tg}\,\theta$. Il viendra :

$$\text{H}\sin\delta = \left\{\begin{array}{l} \Phi\sin Z_c\cos\alpha + \Phi\cos Z_c\sin\alpha \\ + k\text{H}\,\text{tg}\,\theta\sin Z_c\cos\beta + k\text{H}\,\text{tg}\,\theta\cos Z_c\sin\beta \\ + \sum m\text{H}\cos(Z_m + \psi)\sin(Z_c + \gamma), \end{array}\right.$$

ou encore, en posant

$$\Phi\cos\alpha = \text{P} \quad \text{et} \quad \Phi\sin\alpha = \text{Q},$$
$$c = \text{K}\cos\beta \quad \text{et} \quad f = \text{K}\sin\beta.$$

$$\text{H}\sin\delta = \left\{\begin{array}{l} \text{P}\sin Z_c + \text{Q}\cos Z_c \\ + c\text{H}\,\text{tg}\,\theta\sin Z_c + f\text{H}\,\text{tg}\,\theta\cos Z_c \\ + \sum m\text{H}\cos(Z_m + \psi)\sin(Z_c + \gamma), \end{array}\right.$$

ce qui peut s'écrire :

$$\text{H}\sin\delta = \left\{\begin{array}{l} (\text{P} + c\text{H}\,\text{tg}\,\theta)\sin Z_c + (\text{Q} + f\text{H}\,\text{tg}\,\theta)\cos Z_c, \\ + \sum m\text{H}\cos(Z_m + \psi)\sin(Z_c + \gamma). \end{array}\right.$$

Transformons le dernier terme en une somme de sinus. Il viendra :

$$\sin(Z_c + \gamma)\cos(Z_m + \psi) = \frac{1}{2}\sin(Z_c + \gamma + Z_m + \psi)$$
$$+ \frac{1}{2}\sin(Z_c + \gamma - Z_m - \psi),$$

ou $\sin(Z_c + \gamma)\cos(Z_m + \psi) = \frac{1}{2}\sin(2Z_c + \delta + \gamma + \psi)$

$$+ \frac{1}{2}\sin(\gamma - \psi - \delta),$$

ou encore

$$\sin(Z_c + \gamma)\cos(Z_m + \psi) = \left\{\begin{array}{l} \frac{1}{2}\sin(2Z_c + \delta)\cos(\gamma + \psi) \\ + \frac{1}{2}\cos(2Z_c + \delta)\sin(\gamma + \psi) \\ + \frac{1}{2}\sin(\gamma - \psi)\cos\delta - \frac{1}{2}\cos(\gamma - \psi)\sin\delta. \end{array}\right.$$

Finalement, l'équation d'équilibre peut s'écrire :

$$H \sin \delta = \begin{cases} (P + cH \operatorname{tg} \theta) \sin Z_c + (Q + fH \operatorname{tg} \theta) \cos Z_c \\ + \frac{1}{2} \sum mH \sin (2Z_c + \delta) \cos (\gamma + \psi) \\ + \frac{1}{2} \sum mH \cos (2Z_c + \delta) \sin (\gamma + \psi) \\ + \frac{1}{2} \sum mH \sin(\gamma - \psi) \cos\delta - \frac{1}{2} \sum mH \cos(\gamma - \psi) \sin\delta. \end{cases}$$

Transposant et mettant $\sin \delta$ en facteur commun, il vient :

$$H \sin \delta \left[1 + \frac{1}{2} \sum m \cos(\gamma - \psi)\right] = \begin{cases} \quad \frac{1}{2} \sum mH \sin (\gamma - \psi) \cos \delta \\ + (P + cH \operatorname{tg} \theta) \sin Z_c \\ + (Q + fH \operatorname{tg} \theta) \cos Z_c \\ + \frac{1}{2} \sum mH \cos (\gamma + \psi) \sin (2Z_c + \delta) \\ + \frac{1}{2} \sum mH \sin (\gamma + \psi) \cos (2Z_c + \delta). \end{cases}$$

Posons : $$1 + \frac{1}{2} \sum m \cos (\gamma - \psi) = \lambda,$$

$$\frac{1}{2} \sum m \sin (\gamma - \psi) = \lambda a,$$

$$P + cH \operatorname{tg} \theta = \lambda H b,$$

$$Q + fH \operatorname{tg} \theta = \lambda H c,$$

$$\frac{1}{2} \sum m \cos (\gamma + \psi) = \lambda d,$$

$$\frac{1}{2} \sum m \sin (\gamma + \psi) = \lambda e.$$

Il viendra :

$$\lambda H \sin \delta = \lambda H \cos \delta + \lambda H b \sin Z_c + \lambda H c \cos Z_c + \lambda H d \sin (2Z_c + \delta) + \lambda H e \cos (2Z_c + \delta),$$

ou enfin :

$$\sin \delta = a \cos \delta + b \sin Z_c + c \cos Z_c + d \sin (2Z_c + \delta) + e \cos (2Z_c + \delta).$$

Telle est la formule exacte qui unit la déviation et le cap au compas.

46. **Formule d'Archibald Smith.** — La formule rigoureuse qui précède n'est pas d'une application commode, l'inconnue δ figurant dans le second membre.

Si la déviation ne dépasse pas 20 degrés, on peut, sans grande erreur, poser :

$$\cos \delta = 1, \qquad \sin \delta = \delta \sin 1^\circ = \frac{\delta}{57,3},$$

et remplacer $2Z_c + \delta$ par $2Z_c$, ce qui donne, toutes réductions faites :

$$\delta = \begin{cases} 57^\circ,3a + 57^\circ,3b \sin Z_c + 57^\circ,3c \cos 2Z_c, \\ \qquad + 57^\circ,3d \sin 2Z_c + 57^\circ,3e \cos 2Z_c, \end{cases}$$

ou encore :

$$\delta = A + B \sin Z_c + C \cos Z_c + D \sin 2Z_c + E \sin 2Z_c,$$

en posant :

$$A = 57^\circ,3a, \qquad B = 57^\circ,3b, \qquad C = 57^\circ,3c,$$
$$D = 57^\circ,3d, \qquad E = 57^\circ,3e.$$

Telle est la *formule approchée*, connue sous le nom de formule d'*Archibald* Smith, qui unit la déviation au cap au compas du navire.

Si on a suivi attentivement les développements de calcul qui nous ont conduit à cette formule, on reconnaitra l'impossibilité de calculer directement les coefficients A, B, C, D, E, attendu qu'on ignore l'emplacement exact de tous les pôles de fer dur ou de fer doux qui dévient le compas, ainsi que les valeurs de leurs masses magnétiques. Mais, comme on sait que la formule établie représente la loi qui unit δ à Z_c, il suffit, à la rigueur, d'observer cinq déviations à cinq caps bien établis pour obtenir cinq équations dont les inconnues seront A, B, C, D, E.

Quand on aura résolu les équations en question, A, B, C, D, E seront connus, et on pourra, au moyen de la formule, calculer réciproquement la déviation à n'importe quel cap.

Pour l'application de la formule, ne pas perdre de vue que A, B, C, D, E sont exprimés en degrés et dixièmes de

degrés et que les caps Z_c sont comptés de zéro à 360° en partant du Nord et passant par l'Est.

Ainsi, au lieu de SE, on comptera 135°; au lieu de Ouest, 270°; au lieu de NO, 315°.

Il faut faire grande attention aux signes de A, B, C, D, E et aussi aux signes des lignes trigonométriques :

$$\sin Z_c, \quad \cos Z_c, \quad \sin 2Z_c, \quad \cos 2Z_c.$$

Ainsi, supposons que pour un certain compas on ait trouvé :

$$A = -0°,6, \quad B = +3°,3, \quad C = +10°,8, \quad D = -4°,2, \quad E = -0°,7.$$

On demande la déviation le cap au NO.

On aura :

$$\delta = -0°,6 + 3°,3 \sin 315° + 10°,8 \cos 315° - 4°,2 \sin 630° - 0,7 \cos 630°.$$

$$\sin 315° = -\sin 45° = -0,7;$$
$$\cos 315° = \cos 45° = 0,7;$$
$$\sin 630° = \sin 270° = -1;$$
$$\cos 630° = \cos 270° = 0.$$

$$\delta_{NO} = -0,6 + 3,3 \times \overline{0,7} + 10,8 \times 0,7 - 4,2 \times \bar{1} - 0,7 \times 0;$$
$$\delta_{NO} = -0,6 - 2,3 + 7,6 + 4,2;$$
$$\delta_{NO} = +8°,9 = 8°,9 \text{ NE}.$$

Remarquons, en terminant, que le premier terme représente la déviation constante due au fer doux horizontal non rayonnant et à une erreur possible de la ligne de foi, les termes 2 et 3 représentent la déviation semi-circulaire due aux fers durs et au fer doux vertical, les termes 4 et 5 représentent la déviation quadrantale due aux fers doux horizontaux rayonnants, réels ou fictifs.

De nombreuses expériences ont montré que, si le compas est bien placé, A est généralement assez faible, 1 degré au plus. Le coefficient E ne dépasse guère non plus 1 degré si le compas est placé dans le plan longitudinal ou, ce qui

revient au même, si le fer doux horizontal est symétrique par rapport à la rose.

47. Détermination des coefficients A, B, C, D, E. — Pour déterminer expérimentalement les coefficients A, B, C, D, E de la formule d'Archibald Smith, on mesure, par les procédés connus, les huit déviations du compas aux caps cardinaux et aux caps intercardinaux du compas. En remplaçant, dans la formule d'Archibald Smith, Z_c par 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 degrés, il vient, toutes réductions faites :

$$\begin{aligned}
\delta_N &= A \ldots + \quad C \ldots + E; \\
\delta_{NE} &= A + S_4B + S_4C + D; \\
\delta_E &= A + \quad B \ldots\ldots - E; \\
\delta_{SE} &= A + S_4B - S_4C - D; \\
\delta_S &= A \ldots - \quad C \ldots + E; \\
\delta_{SO} &= A - S_4B - S_4C + D; \\
\delta_O &= A - \quad B \ldots\ldots - E; \\
\delta_{NO} &= A - S_4B + S_4C - D.
\end{aligned}$$

S_4 représente le sinus de 45°, qui a pour valeur :

$$\frac{\sqrt{2}}{2} = 0,7.$$

Comme il n'y a que cinq inconnues A, B, C, D, E, et qu'il y a huit équations en A, B, C, D, E, il y a plus d'équations qu'il n'est utile. On en profite pour obtenir plus exactement les inconnues en se servant, de la manière suivante, de toutes les équations :

Calcul de A. — Si on examine les huit équations, on remarque que les termes en B, C, D, E sont, deux à deux, égaux et de signes contraires. Si donc on ajoute les huit équations membre à membre, ces termes disparaissent et l'on a :

$$8A = \delta_N + \delta_{NE} + \delta_E + \delta_{SE} + \delta_S + \delta_{SO} + \delta_O + \delta_{NO},$$

et, par conséquent :

$$A = \frac{\delta_N + \delta_{NE} + \delta_E + \delta_{SE} + \delta_S + \delta_{SO} + \delta_O + \delta_{NO}}{8}.$$

Calcul de B. — Pour avoir B, qui n'entre que dans six des huit équations, multiplions les deux membres de ces six équations par le coefficient de B dans chacune d'elles, avec son signe, si ce coefficient est positif, en signe contraire, quand ce coefficient est négatif.

Après cette opération, les termes en A, C, D, E ont des coefficients égaux et de signes contraires deux à deux; les coefficients de B sont tous devenus positifs et sont successivement :

$$0{,}5, \quad 1, \quad 0{,}5, \quad 0{,}5, \quad 1, \quad 0{,}5;$$

car

$$S_4 \times S_4 = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{1}{2} = 0{,}5.$$

Si donc on ajoute membre à membre les six équations modifiées comme il vient d'être dit, le premier membre aura pour valeur :

$$S_4\delta_{NE} + \delta_E + S_4\delta_{SE} - S_4\delta_{SO} - \delta_O - S_4\delta_{NO};$$

le second membre aura pour valeur :

$$0{,}5B + B + 0{,}5B + 0{,}5B + B + 0{,}5B,$$

ou

$$4B.$$

On aura donc :

$$B = \frac{S_4\delta_{NE} + \delta_E + S_4\delta_{SE} - S_4\delta_{SO} - \delta_O - S_4\delta_{NO}}{4}.$$

Calcul de C. — En opérant pour C comme il a été dit pour B, dans les six équations qui contiennent C, on aura de même :

$$C = \frac{\delta_N + S_4\delta_{NE} - S_4\delta_{SE} - \delta_S - S_4\delta_{SO} + S_4\delta_{NO}}{4}.$$

Calcul de D. — Le coefficient D n'entrant que dans les quatre équations aux points intercardinaux, si on multi-

plie les deux membres par $+1$ ou -1, suivant que le coefficient de D est positif ou négatif, on aura :

$$\delta_{NE} = \quad A + S_4B + S_4C + D;$$
$$-\delta_{SE} = -A - S_4B + S_4C + D;$$
$$\delta_{SO} = \quad A - S_4B - S_4C + D;$$
$$-\delta_{NO} = -A + S_4B - S_4C + D.$$

Ajoutant membre à membre, il vient :

$$\delta_{NE} - \delta_{SE} + \delta_{SO} - \delta_{NO} = 4D;$$

d'où
$$D = \frac{\delta_{NE} - \delta_{SE} + \delta_{SO} - \delta_{NO}}{4}.$$

Calcul de E. — En opérant pour E comme pour D, sur les équations aux points cardinaux, on trouve de même :

$$E = \frac{\delta_N - \delta_E + \delta_S - \delta_O}{4}.$$

Afin d'éviter d'avoir à écrire les équations, on dresse un tableau dans lequel on inscrit les caps dans la première colonne, dans la deuxième les déviations avec leurs signes (en degrés et dixièmes), puis dans les autres colonnes les facteurs par lesquels on doit multiplier les déviations, avec, à côté, une colonne où on inscrit le produit algébrique trouvé.

Le total algébrique des déviations, ou des divers produits, donne 8A, 4B, 4C, 4D, 4E, d'où on tire, par division, A. B, C, D, E.

Le tableau ci-contre indique la disposition à adopter.

48. *Remarque.* — Quand on veut obtenir avec une plus grande exactitude les coefficients A, B, C, D, E, on peut, si on en a le temps, faire tourner le bâtiment successivement dans les deux sens, et inscrire dans la colonne « déviations » la moyenne des déviations obtenues à chaque cap. Cette précaution est presque indispensable si le navire est demeuré longtemps à quai dans des évitages voisins de l'Est ou de l Ouest. Car il se forme alors dans

les baux qui sont N.-S. des pôles magnétiques, qui ne disparaissent pas brusquement (voir plus loin, *erreur Gaussin*) quand le navire change de cap. Ces baux étant en fer mixte, ni doux ni dur, l'aimantation acquise ne disparaît pas instantanément comme si les baux étaient en fer doux. Si on tourne le navire dans les deux sens, les déviations anormales résultant de ces *inductions tenaces* sont de sens contraires et disparaissent dans la moyenne.

Calcul des coefficients.

CAPS	DÉVIATION	FACTEURS	PRODUITS	FACTEURS	PRODUITS	FACTEURS	PRODUITS	FACTEURS	PRODUITS
N	....	0	....	1	....	0	....	1	....
NE	....	0,7	....	0,7	....	1	....	0	....
E	....	1	....	0	....	0	....	— 1	....
SE	....	0,7	....	— 0,7	....	— 1	....	0	....
S	....	0	....	— 1	....	0	....	1	....
SO	....	— 0,7	....	— 0.7	....	1	....	0	....
O	....	— 1	....	0	....	0	....	— 1	....
NO	....	— 0,7	....	0,7	....	— 1	....	0	....
Somme des +........			+........		+........		+........		+........
Somme des —........			—........		—........		—........		—........
8A =	....	4B =	....	4C =	....	4D =	....	4E =	....
A =	....	B =	....	C =	....	D =	....	E =	....

DEUXIÈME PARTIE

COMPENSATION DES COMPAS

---

49. Étude des variations de la force directrice totale de l'aiguille aimantée dans quelques cas très simples. But de la compensation.

A. *Le compas n'est soumis qu'à l'action déviatrice de masses quelconques de fer dur.* — Nous avons vu que l'effet des pôles de fer dur répartis dans le navire peut, en dernier ressort, se ramener à un couple dont chacune des forces Φ a une valeur et un gisement α bien déterminés.

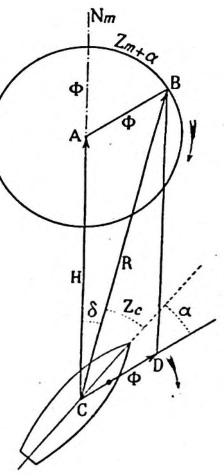


Fig. 28.

L'aiguille aimantée se met en équilibre quand elle est orientée suivant la diagonale du parallélogramme ABDC ayant pour côtés les forces Φ et H.

La *force totale* agissant sur l'aiguille est représentée en grandeur et en direction par cette diagonale CB. La déviation est mesurée par l'angle ACB. L'angle $N_m AB$ représente la somme de Z_m et de l'angle de gisement α. Quand le navire évolue, cet angle $Z_m + \alpha$ passe par toutes les valeurs

possibles comprises entre zéro et 360°. Pour suivre les variations de R, il suffit de suivre les variations du triangle ABC quand l'angle extérieur $N_m AB$ varie entre zéro et 360°. Comme on sait que, dans un triangle, un côté quelconque est plus petit que la somme des deux autres et plus grand que leur différence, on aura :

$$H - \Phi < R < H + \Phi,$$

R devenant égal à $H + \Phi$ quand $Z_m + \alpha = 0$ et à $H - \Phi$ quand $Z_m + \alpha = 180°$.

Si, par exemple, Φ est égal à $\frac{H}{4}$, R pourra varier entre

$$\frac{5H}{4} \quad \text{et} \quad \frac{3H}{4}.$$

B. ***Le compas est soumis à l'action réunie du fer dur et du fer doux vertical.*** — Tant qu'on ne change pas de lieu, le fer doux vertical se comporte comme le fer dur pour dévier le compas; par conséquent, tout ce que nous avons dit du fer dur s'applique encore ici, pourvu que Φ représente la résultante des forces émanant du fer dur et du fer doux vertical.

C. ***Le compas n'est soumis qu'à l'action déviatrice d'une barre rayonnante horizontale de fer doux.*** — Nous savons que, dans ce cas, le compas est soumis à l'action déviatrice d'un couple dont les forces ont une valeur variable avec le cap. On peut donner à l'une de ces forces φ l'expression

$$\varphi = mH \cos(Z_m + \gamma).$$

Le parallélogramme des forces a donc, dans le cas actuel, un côté constant $CA = H$ et un côté variable φ, qui sera mesuré géométriquement par la corde AB du cercle GBA de diamètre mH, cette corde faisant avec AN_m un angle égal à $Z_m + \gamma$.

Quand l'angle GAB ou $Z_m + \gamma$ variera de zéro à 360°, l'arc GB, qui est égal à $2Z_m + 2\gamma$, variera entre zéro et 720°.

La corde AB variera entre mH et zéro, puis entre zéro et mH, puis entre mH et zéro, etc., pour des variations successives de 90° de l'angle $Z_m + \gamma$.

Par conséquent, en supposant, comme dans la figure, que m est positif, R variera entre $H + mH$ et H.

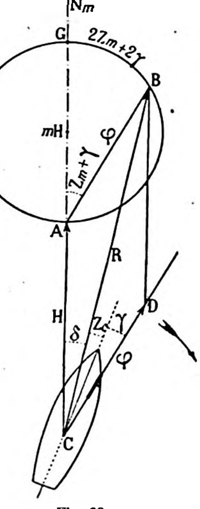


Fig. 29.

Si m était négatif, le cercle GBA serait en dessous du point A, et la résultante R varierait entre H et $H - mH$.

C'est ce cas qui est le plus habituel, la partie la plus importante du fer doux horizontal étant constituée par les baux qui passent en dessous de la rose.

Dans ce cas, si nous supposons $m = 0{,}2$, la force directrice totale de l'aiguille variera entre H et les $\frac{8}{10}$ de H.

Si on avait $m = 0{,}4$, R varierait entre H et 0,6 H.

Remarque. — S'il y avait plusieurs pôles de fer doux horizontal, on ne pourrait, en composant par la règle du polygone des forces les forces qu'ils engendrent, obtenir une résultante bien déterminée en grandeur et en direction, car les forces émanant du fer doux horizontal ont bien des gisements constants, mais leur grandeur change avec le cap et les valeurs de ces forces ne demeurent pas proportionnelles quand le navire change de cap.

On voit par là que si, à certains caps, les forces émanant du fer dur, celles émanant du fer doux vertical et celles émanant du fer doux horizontal travaillent toutes à contre

de H, la force directrice totale de l'aiguille peut devenir très faible. Nous avons vu ce phénomène se produire sur les côtes d'Islande, où un compas ordinaire mal placé n'indiquait plus du tout le cap du navire.

Le but de la compensation est de libérer, en quelque sorte, le compas des efforts qui paralysent son action, afin que la résultante R *des forces agissant sur le compas soit peu différente de la force* H *de la Terre.*

On ne se propose donc pas, comme on pourrait le croire, d'annuler complètement les déviations, afin d'éviter les corrections qu'elles nécessitent. Quoi qu'on fasse, on n'arrive jamais à les détruire complètement.

Mais il faut bien comprendre : 1° qu'un compas non compensé *dort* à certains caps où, comme nous l'avons expliqué plus haut, les forces déviatrices ont une résultante opposée ou à peu près à la force directrice H de la Terre.

A ces caps, les frottements du pivot suffisent à empêcher l'aiguille de s'établir nettement à une position d'équilibre invariable. Si on écarte l'aiguille de 2 ou 3 degrés sur la droite ou sur la gauche, elle reste immobile dans la position qu'on vient de lui donner.

En second lieu, comme les déviations varient avec le cap, si celles qui proviennent du fer doux horizontal sont considérables, comme elles changent rapidement de valeur avec le cap, pour des caps distants de 40 à 45° par exemple, *l'abattée apparente pourra différer beaucoup de l'abattée réelle.* Cet inconvénient grave est évité si le compas est compensé. Les abattées apparentes diffèrent à peine des abattées réelles, puisque les déviations sont alors très faibles aux deux caps qui constituent l'embardée du navire.

50. **Définitions.** — *Compenser* un compas, c'est, au moyen de correcteurs appropriés, détruire la déviation à tous les caps. On ne peut obtenir ce résultat qu'en opposant aux causes déviatrices des compensateurs de même nature.

Nous avons vu qu'on pouvait fictivement ramener tous les fers du bord aux quatre groupes suivants :

1° Un pôle de fer dur situé sur l'AV ou sur l'AR du compas, exerçant sur la pointe N de l'aiguille une force P ;

2° Un pôle de fer dur situé transversalement au compas, exerçant sur la pointe N de l'aiguille une force Q ;

3° Une barre de fer doux verticale placée sur l'AV ou sur l'AR du compas : on admet que le fer doux vertical latéral est négligeable ;

4° Une barre de fer doux horizontale ayant un pôle actif de gisement γ et d'orientation ψ, pouvant être fictivement remplacée par une barre rayonnante de gisement et d'orientation γ_m, pourvu qu'on suppose en plus une déviation constante à tous les caps.

Pour que le compas soit exactement compensé, il faudra opposer au fer dur longitudinal des aimants longitudinaux, au fer dur transversal des aimants transversaux, au fer doux vertical une barre de fer doux verticale convenablement disposée (barre de Flinders), au fer doux horizontal, oblique, une barre de fer doux horizontale, perpendiculaire au fer doux horizontal qui dévie le compas, ou, ce qui revient au même, deux globes de fer doux (globes compensateurs).

51. Compas Thomson. — Ce compas est le seul qui permette une compensation annulant les effets du magnétisme permanent et induit des fers du navire.

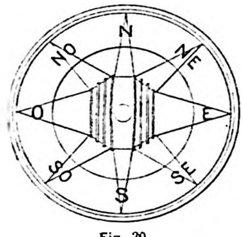


Fig. 30.

Le compas Thomson (fig. 30) diffère des autres compas principalement par le mode de suspension de la rose et le système d'aiguilles aimantées qui comporte en général huit aiguilles placées symétriquement par rapport au centre

de la rose, et inscrites dans un cercle de 0m,09 de diamètre pour la rose de 0m,25, et de 0m,07 pour la rose de 0m,20. La charpente de la rose est formée d'une couronne en aluminium réunie par trente-deux ou dix-huit rayons en cordonnets de soie à un petit disque central en aluminium, qui est percé d'un trou pour le passage de la chape[1]. Un cordonnet de soie collé à la gomme laque passe dans les trous des extrémités des aiguilles, qui forment ainsi un plateau octogonal suspendu directement au cercle d'aluminium au moyen de huit pattes d'oie, dont les sommets correspondent aux huit caps principaux, et les branches aux sommets de l'octogone.

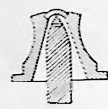


Fig. 31.

La chape (fig. 31) est en saphir, et la pointe du pivot en osmiure d'iridium. La plus grande partie du poids de la charpente étant transportée à la périphérie, le moment d'inertie de la rose est très grand ; aussi, bien que son poids soit assez faible, la rose possède une grande stabilité mécanique tout en ayant une sensibilité remarquable.

Elle satisfait aux conditions permettant la compensation, savoir : 1° aiguilles assez petites pour que les actions des aimants sur leurs pôles soient les mêmes que si ces pôles étaient au centre du compas; 2° action magnétique des aiguilles sur les compensateurs de fer doux nulle ou peu sensible.

Avec les anciens compas, dont l'aiguille aimantée était souvent constituée par un assemblage de deux plaques d'acier aimantées parallèles de poids appréciable, recouvertes d'un cercle en talc et d'une rose en papier, il aurait fallu des tonnes de fer doux pour pouvoir réaliser la compensation.

Le socle de l'instrument (fig. 32) est composé d'un fût en

---

[1] Sur la figure 30 on n'a pas représenté ces cordonnets qui unissent la couronne au disque central.

bois portant à sa partie supérieure le manchon en cuivre auquel est suspendue la cuvette.

La cuvette a parfois un double fond dans lequel on met

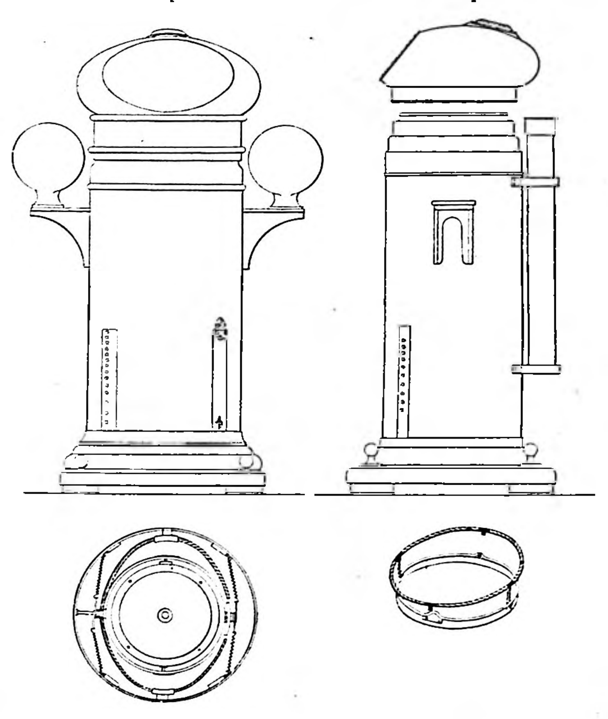


Fig. 32.

de l'huile visqueuse pour amortir les oscillations résultant de mouvements brusques du navire ; elle est suspendue à la Cardan. Dans l'axe même du fût en bois, se trouve généralement un tube en cuivre dans lequel glisse l'étui en

cuivre de l'aimant correcteur de bande, qu'une chainette permet de faire monter ou descendre.

Le fût porte deux rangées de logements longitudinaux et une rangée de logements transversaux pour les aimants correcteurs de la déviation semi-circulaire; des nombres, généralement allant de 6 à 20 en remontant, proportionnels aux forces correctrices produites par un même barreau, sont inscrits à côté des trous.

Les globes compensateurs de fer doux reposent de chaque côté sur des consoles en fonte; la gaine en cuivre de la barre de Flinders est placée le long d'une génératrice du fût située dans un plan parallèle au plan diamétral. Cette gaine, retenue par un collier, est posée sur une console, ce qui permet d'empiler sur la console les cylindres de bois et de fer doux. Selon le navire, la barre de Flinders doit être sur l'avant ou sur l'arrière du compas.

52. Méthode officielle de compensation sur les navires de l'État. (Théorie et pratique.)

1° **Fer doux horizontal.** — Nous avons vu qu'à part une déviation constante, une barre de fer doux horizontale ayant un pôle actif de gisement γ et une orientation ψ produisait la même déviation partielle

$$\delta = \frac{57^{o},3\, m \sin (2Z_c + 2\gamma_m)}{2\lambda},$$

qu'une barre fictive de fer doux rayonnante ayant une orientation $$\gamma_m = \frac{\gamma + \psi}{2}.$$

Pour détruire cette déviation à tous les caps, deux moyens principaux se présentent :

1° Placer près du compas (fig. 33, 34, 35) une barre rayonnante de fer doux d'orientation γ_m, mais placée de telle façon que son pôle actif exerce sur le pôle Nord de l'aiguille une action égale et de signe contraire à celle qu'exerce la barre fictive d'orientation γ_m;

2° Placer près du compas (fig. 36) une barre de fer doux

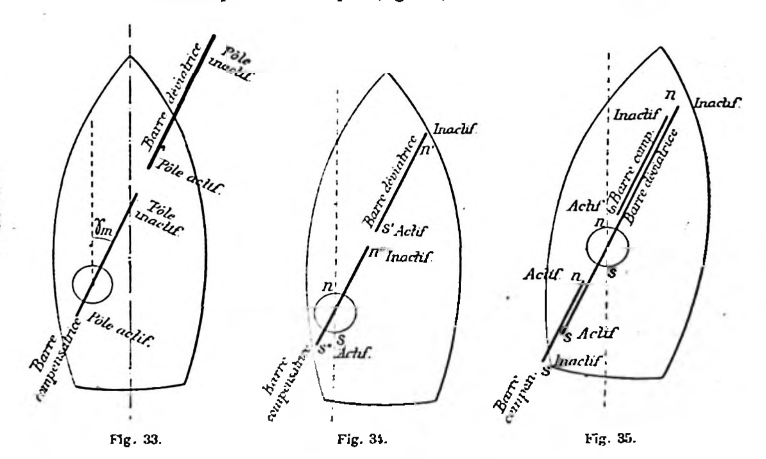


Fig. 33. Fig. 34. Fig. 35.

rayonnante ayant même coefficient que la barre fictive déviatrice, mais orientée perpendiculairement à cette barre.

En effet, si on appelle γ' le gisement de la barre compensatrice, la déviation produite par cette barre sera :

$$\delta' = \frac{57°,3\, m \sin(2Z_c + 2\gamma')}{2\lambda}.$$

Mais, si

$$\gamma' = 90° + \gamma_m,$$

on aura :

$$2\gamma' = 180 + 2\gamma_m;$$

par suite, à tous les caps, on aura :

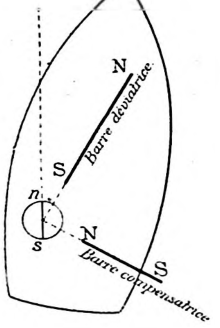


Fig. 36.

$$\sin(2Z_c + 2\gamma') = -\sin(2Z_c + 2\gamma_m),$$

et, par suite, à tous les caps :

$$\delta' = -\delta.$$

Rien n'empêchera évidemment de remplacer cette barre unique par deux barres, placées de chaque côté de la rose (fig. 37), pourvu qu'on donne à chacune la section voulue et qu'on la place à une distance convenable du centre de la rose.

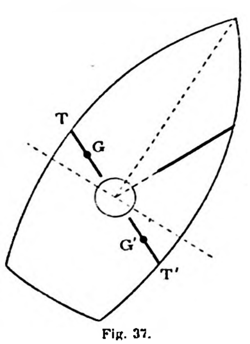


Fig. 37.

Le gouvernement hollandais a exposé en 1907, à l'exposition coloniale de Marseille, un compas ainsi disposé.

Lord Kelvin (sir William Thompson) a trouvé plus avantageux de substituer à ces deux barres deux globes creux de fer doux, G, G'. Ces globes s'aimantent par induction du champ terrestre, et tout se passe comme si, dans l'intérieur de chacun d'eux, il se formait un aimant très court, demeurant parallèle à l'aiguille d'inclinaison malgré les changements de cap du navire.

On est ramené, en fin de compte, à trouver quelle orientation il faut donner à la ligne des centres des globes compensateurs et à quelle distance on doit placer lesdits globes sur leurs potences.

Pour y arriver, remarquons que la barre fictive de gisement et d'orientation γ_m produit une déviation quadrantale donnée par la formule

$$D \sin 2Z_c + E \cos 2Z_c.$$

Nous avons vu qu'entre γ_m, D et E on avait la relation

$$\operatorname{tg} 2\gamma_m = \frac{E}{D}.$$

Si nous appelons x le gisement de la barre rayonnante

qui doit détruire l'action de la barre déviatrice, nous devons avoir :

$$x = 90^\circ + \gamma_m,$$
$$2x = 180^\circ + 2\gamma_m,$$

et, en valeur absolue,

$$\text{tg}\, 2x = \text{tg}\, 2\gamma_m = \frac{E}{D}.$$

On devra calculer l'angle $2x$ par cette formule; mais on observera que le sinus de $2x$ doit être de signe contraire au sinus de $2\gamma_m$, c'est-à-dire à E, et que le cosinus de $2x$ doit être de signe contraire à celui de $2\gamma_m$, c'est-à-dire à D, puisqu'on sait que l'on a :

$$D = \frac{57^\circ{,}3\, m \cos 2\gamma_m}{\lambda},$$

et

$$E = \frac{57^\circ{,}3\, m \sin 2\gamma_m}{\lambda}.$$

On prendra donc $2x$ dans un quadrant tel que, tout en ayant, en valeur absolue, $\text{tg}\, 2x = \frac{E}{D}$, le sinus de $2x$ soit de signe contraire à E et le cosinus de signe contraire à D.

Ainsi, si on a :

$$D = -10^\circ{,}0,$$
$$E = +8^\circ{,}4,$$

on aura :

$$\text{tg}\, 2x = \frac{8{,}4}{10{,}0} = 0{,}84,$$

en valeur absolue.

L'arc du premier quadrant, ayant pour tangente 0,84, est un arc de 40°:

Mais le sinus de $2x$ doit être de signe contraire à E, donc négatif, et le cosinus de signe contraire à D, donc positif.

Ceci exige que $2x$ tombe dans le quatrième quadrant.

On a ainsi : $2x = 360 - 40 = 320^\circ,$

et $x = 160^\circ.$

La ligne des centres des globes devra donc être orientée de façon que le globe de tribord fasse avec l'avant (fig. 38) un angle de 160°.

Quant à la distance à donner aux globes, elle sera réglée par la formule $\Delta = \sqrt{D^2 + E^2}$,

Δ représentant le *pouvoir déviateur* maximum du fer doux horizontal : la compensation sera rigoureusement exacte lorsqu'on aura pour le *pouvoir compensateur* des globes la même valeur Δ.

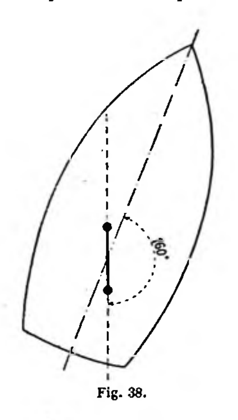


Fig. 38.

Ce pouvoir compensateur dépendant du diamètre des globes et de leur distance au centre de la rose, on les place sur les potences convenablement orientées, en consultant le tableau ci-contre, qui a été établi expérimentalement pour différents numéros de globes.

On entre dans ce tableau avec le diamètre des globes en millimètres comme argument horizontal, et la déviation maxima à compenser, Δ, comme argument vertical. En faisant cadrer ces deux quantités, on trouve à quelle distance du centre de la rose doit se trouver le bord intérieur des globes compensateurs.

Si E est négligeable $(E < 0^\circ{,}5)$, on placera, sans calcul, les globes : T^d-B^d si D est positif, $\mathcal{N}$-$\mathcal{R}$ si D est négatif. Au lieu d'entrer dans le tableau avec $\Delta = \sqrt{D^2 \times E^2}$, on entrera avec $\Delta = D$.

Dans beaucoup de compas, les potences ne peuvent pas s'orienter ; cela tient à ce que E est faible sur les navires en question, et qu'on peut se dispenser d'incliner la ligne des centres. Sur beaucoup de navires, les globes sont placés T^d-B^d. Cela provient de ce que, sur ces navires, le fer doux horizontal qui dévie les compas peut être attribué en grande partie aux baux qui traversent le navire en dessous de la rose. Ce n'est d'ailleurs que par la connaissance

Distance en millimètres au centre du compas du bord intérieur des globes compensateurs.

Δ	DIAMÈTRE DES GLOBES					
	152	178	216	254	280	305
0,5	456					
1,0	346					
1.5	292					
2.0	258					
2,5	234					
3.0	215	252				
3,5	200	235				
4,0	188	220				
4.5	178	208	253			
5.0	167	198	240			
5.5	161	189	229			
6.0	154	180	219	257		
6,5	148	173	210	247		
7,0	142	166	202	237		
7.5	137	160	195	229	252	
8,0	132	155	188	221	244	
8,5		150	182	214	236	
9.0		145	176	207	228	248
9.5		141	171	201	221	241
10.0		137	166	195	215	234
10,5		130	161	189	209	227
11.0			157	184	203	221
11,5			153	179	198	215
12.0			149	175	193	210
12.5			145	171	188	205
13,0			142	167	184	200
13,5			138	163	179	195
14,0			132	155	171	187
14.5				152	167	183
15,0				149	164	179
15.5				146	160	175
16.0				143	157	171
16.5				140	154	168
17.0				137	151	164
17.5				134	148	161
18.0				132	145	158
18.5					142	155
19,0					140	152
19.5					137	150
20,0						

préalable du signe de D qu'on peut savoir à l'avance si les globes placés T^d-B^d seront bien orientés.

La compensation ainsi faite de la déviation quadrantale est définitive (à moins qu'on ne vienne à modifier le chargement), car, lorsqu'on changera de lieu, les globes compensateurs subiront dans leur aimantation, par induction terrestre, les mêmes modifications que celles que subiront les fers doux horizontaux du navire, puisque nous avons vu que leur aimantation est proportionnelle à la composante H du champ terrestre.

2° **Fer dur transversal.** — Une fois la déviation quadrantale corrigée au moyen des globes compensateurs, les termes $D \sin 2Z_c$ et $E \cos 2Z_c$ de la formule d'Archibald Smith sont nuls désormais, et la loi des déviations du compas se réduit à

$$\delta = A + B \sin Z_c + C \cos Z_c.$$

Mettons le cap au Nord magnétique. Introduisons des aimants transversaux dans le fût du compas. Le coefficient C de la formule d'Archibald Smith prend une nouvelle valeur C'; la loi des déviations est, à ce moment :

$$\delta = A + B \sin Z_c + C' \cos Z_c.$$

Mais alors modifions par tâtonnement l'emplacement ou le nombre des aimants transversaux de telle façon que, le navire demeurant le cap au Nord magnétique, la déviation à ce cap devienne nulle. Le coefficient C' a pris une valeur spéciale C''. On a, à cet instant :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_c = Z_m = 0.$$

Donc, pour le cap $Z_c = Z_m = 0$, on a la relation

$$0 = A + B \times 0 + C'' \times 1 ;$$

d'où

$$C'' = -A.$$

Par conséquent, par suite de l'adjonction des aimants transversaux, la loi de la déviation du compas est actuellement :

$$\delta = A + B \sin Z_c - A \cos Z_c.$$

3° **Fer dur longitudinal.** — Mettons le cap à l'Est magnétique. Introduisons (par paires) des aimants longitudinaux

dans le fût du compas. Le coefficient B est altéré et prend une valeur nouvelle B'. Modifions par tâtonnement l'emplacement ou le nombre des aimants longitudinaux, de telle façon que, le navire ayant toujours le cap à l'Est magnétique, la déviation à ce cap devienne nulle. Le coefficient B' prendra une valeur spéciale B''. On aura, à cet instant :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_c = Z_m = 90^\circ.$$

Donc, pour le cap $Z_c = Z_m = 90^\circ$, on a la relation

$$0 = A + B'' \times 1 - A = 0;$$

d'où $$B'' = -A.$$

Par conséquent, par suite de l'adjonction des aimants longitudinaux, la loi de la déviation du compas est actuellement : $$\delta = A - A \sin Z_c - A \cos Z_c.$$

4° Annulation de la moitié de la déviation résiduelle au Sud magnétique. — Mettons maintenant le cap au Sud magnétique. Le navire demeurant à ce cap, modifions le nombre ou l'emplacement des aimants transversaux de manière à détruire la moitié de la déviation résiduelle. Remarquons que, si on avait le cap au Sud du compas, on aurait $Z_c = 0$, et la déviation à ce cap serait :

$$\delta_s = A - A \times 0 - A \times -1 = 2A.$$

Au Sud magnétique qui, actuellement, diffère très peu du Sud du compas, la déviation est aussi à peu près égale à 2A. En retouchant les aimants transversaux, on modifie le coefficient A du terme $-A \cos Z_c$: ce coefficient prend une valeur nouvelle A'. Si, par tâtonnement, on arrive à réduire à la moitié de sa valeur, c'est-à-dire à A, la déviation qui était égale à 2A, le coefficient A' aura encore pris une nouvelle valeur A'', et on aura à cet instant :

$$\delta = A, \quad Z_m = 180, \quad Z_c = 180 - A.$$

En conséquence, on aura :

$$A = A - A \sin(180 - A) - A'' \cos(180 - A).$$

Le sinus de $180 - A$ est très petit; le cosinus est à peu près égal à -1. On a donc sensiblement :

$$A = A - A \times 0 - A'' \times -1 ;$$

d'où $$A'' = 0.$$

En conséquence, la loi des déviations du compas est maintenant : $$\delta = A - A \sin Z_c.$$

5° Annulation de la moitié de la déviation résiduelle, le cap à l'Ouest magnétique. — Mettons le cap à l'Ouest magnétique. Si le cap était à l'Ouest du compas, la déviation à ce cap serait :

$$\delta_o = A - A \times -1 = 2A.$$

Comme l'Ouest magnétique diffère peu actuellement de l'Ouest du compas. la déviation est encore 2A à ce cap.

En retouchant les aimants longitudinaux, nous modifions le coefficient A du terme $-A \sin Z_c$. Ce coefficient prend une valeur nouvelle A'.

Si, par tâtonnement, nous arrivons à réduire à moitié de sa valeur, c'est-à-dire à A, la déviation qui était égale à 2A, le coefficient A' aura pris encore une nouvelle valeur A'', et on aura à cet instant :

$$\delta = A, \quad Z_m = 270, \quad Z_c = 270 - A.$$

En conséquence, on aura :

$$A = A - A'' \sin (270 - A),$$

ou $$0 = - A'' \times - \cos A = A'' \cos A.$$

Le cosinus de A étant à peu près égal à 1, on a :

$$A'' = 0.$$

Désormais donc la loi des déviations se réduit à

$$\delta = A.$$

Autrement dit, la déviation a une valeur constante A à tous les caps.

53. **Dosage du Flinders.** — La compensation telle qu'elle vient d'être effectuée ci-dessus est suffisante si le navire doit naviguer par des latitudes magnétiques peu différentes; mais, s'il doit changer notablement de latitude magnétique, la compensation qu'on vient de faire n'est que provisoire. En effet, on n'a compensé, le cap à l'Est magnétique, la déviation causée à ce cap par le fer dur longitudinal et par le fer doux vertical longitudinal que par des aimants longitudinaux, autrement dit par du fer dur.

Il faut s'attendre à voir la déviation reparaître, le cap à l'Est, quand on aura changé de latitude magnétique. Pour obtenir une compensation exacte, il faut, dans le nouveau lieu, détruire la déviation le cap à l'Est par des aimants longitudinaux et par une barre de fer doux spéciale, nommée *barre de Flinders*, en proportionnant les deux modes de compensation aux deux causes de déviation.

Pour obtenir ce résultat, autrement dit pour *doser* le Flinders, on commencera par enlever du compas les aimants longitudinaux et on déterminera, par les moyens expliqués plus haut, la valeur du coefficient B' dans le lieu actuel.

Dans le premier lieu, où la force horizontale est égale à H et l'inclinaison à θ, on a :

$$B = \frac{57^\circ{,}3\,P}{\lambda H} + \frac{57^\circ{,}3\,c\,\mathrm{tg}\,\theta}{\lambda}.$$

Dans le second lieu, de force horizontale H', d'inclinaison θ', on a :

$$B' = \frac{57^\circ{,}3\,P}{\lambda H'} + \frac{57^\circ{,}3\,c\,\mathrm{tg}\,\theta'}{\lambda}.$$

Les premiers termes des seconds membres représentent les déviations causées par le fer dur; les seconds termes, les déviations causées par le fer doux vertical longitudinal.

Posons : $x = \frac{57^\circ{,}3\,P}{\lambda H}, \quad y = \frac{57^\circ{,}3\,c\,\mathrm{tg}\,\theta}{\lambda},$

$$x' = \frac{57^\circ{,}3\,P}{\lambda H'}, \quad y' = \frac{57^\circ{,}3\,c\,\mathrm{tg}\,\theta'}{\lambda}.$$

On aura évidemment :

$$B = x + y, \tag{1}$$

$$B' = x' + y', \tag{2}$$

$$\frac{x}{x'} = \frac{H'}{H}, \tag{3}$$

$$\frac{y}{y'} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta'}. \tag{4}$$

Résolvons ces équations en vue d'obtenir x' et y'. On aura :

$$x = \frac{x'H'}{H} \quad \text{et} \quad y = \frac{y' \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta'}.$$

Substituons dans l'équation (1). Nous aurons :

$$B = \frac{x'H'}{H} + \frac{y' \operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \theta'}, \tag{5}$$

$$B' = x' + y'. \tag{6}$$

On est donc ramené à résoudre un système de deux équations à deux inconnues.

Supposons que, ayant remplacé les quantités connues par leurs valeurs numériques, on trouve tout compte fait :

$$x' = -14^\circ, \qquad y' = +4^\circ.$$

On en conclura que, dans le second lieu, le fer dur, le cap à l'Est, produit une déviation de 14° NO, et le fer doux, une déviation de 4° NE.

Dans le second lieu, il faudra donc, le cap à l'Est magnétique, faire tourner la rose de 14 degrés sur la droite, au moyen d'aimants longitudinaux introduits par paires dans le fût du compas, et annuler les 4 degrés dont la ligne de foi diffère alors de l'Est de la rose au moyen de la barre de Flinders[1], suffisamment allongée par le bas, de sorte qu'à ce moment la déviation, le cap à l'Est, soit nulle.

---

[1] Dans l'hémisphère magnétique Nord, si y' est positif, la barre de Flinders sera mise sur l'*AR*, si y' est négatif, la barre de Flinders sera placée sur l'*AV* ; dans l'hémisphère magnétique Sud, il faudra placer le Flinders sur l'*AV* si y' est négatif, sur l'*AR* si y' est positif.

EXEMPLE.

$$B = -4^\circ{,}0,\quad H = 0{,}8,\quad \theta = 72^\circ,\quad \operatorname{tg}\theta = 3{,}10.$$
$$B' = -3^\circ{,}6,\quad H' = 1{,}8,\quad \theta' = 62^\circ,\quad \operatorname{tg}\theta' = 1{,}88.$$

$$\frac{x'H'}{H} + \frac{y'\operatorname{tg}\theta}{\operatorname{tg}\theta'} = B,\qquad \frac{1{,}8}{0{,}8}x' + \frac{3{,}10}{1{,}88}y' = -4{,}0,$$
$$x' + y' = B',\qquad x' + y' = -3{,}6.$$

On a donc :

$$2{,}25\,x' + 1{,}67\,y' = -4{,}0,$$

et
$$x' + y' = -3{,}6.$$

Multipliant par 2,25 les deux membres de la dernière équation, il vient :

$$2{,}25\,x' + 1{,}67\,y' = -4{,}0,$$

et
$$2{,}25\,x' + 2{,}25\,y' = -8{,}1.$$

On tire de là :

$$0{,}58\,y' = -4{,}1,$$

et
$$y' = -\frac{4{,}1}{0{,}58} = -7^\circ{,}07,$$

et, par suite :
$$x' = -3^\circ{,}60 + 7^\circ{,}07 = 3^\circ{,}47.$$

Il faut donc, dans le second lieu, compenser avec la barre de Flinders 7°,1 de déviation NO, en faisant tourner la rose de 7°,1 sur la droite, le navire étant maintenu à l'Est magnétique; puis on ramènera le Nord de l'aiguille sur la ligne de foi, en faisant tourner la rose de 3°,5 sur la gauche au moyen d'aimants longitudinaux placés par paires dans le fût du compas.

54. **Résumé des règles pratiques de compensation.** — De la théorie qui précède résultent les règles suivantes de compensation :

Le navire étant au poste de réglage, on déshabille le compas de tous les compensateurs, s'ils sont en place; les mâts de charge, canons, embarcations sont mis à leur poste de mer. Cela fait, il convient d'opérer dans l'ordre suivant :

1° Déterminer préalablement les coefficients de la for-

mule d'Archibald Smith, en plaçant le navire aux points cardinaux et intercardinaux du compas.

Si E est nul ou négligeable, orienter la potence des globes compensateurs T^d — B^d, si D est positif, Av — Ar si D est négatif.

Si E a une valeur appréciable, calculer l'orientation à donner aux potences par la formule

$$\operatorname{tg} 2x = \frac{E}{D},$$

en prenant $2x$ dans un quadrant tel que son sinus soit de signe contraire à E, son cosinus de signe contraire à D.

2° Chercher dans le tableau à quelle distance du centre de la rose doit être placé le bord le plus rapproché des globes. Pour cela, faire cadrer, dans la table incluse dans ce traité, le diamètre des globes en millimètres avec la quantité $\Delta = \sqrt{D^2 + E^2}$, ou avec $\Delta = D$, si E est moindre qu'un demi-degré. Placer les globes à la distance obtenue et serrer les écrous qui les fixent aux potences. x représente l'angle que le globe de T^d doit faire en allant de l'avant vers tribord. Orienter les potences en conséquence.

3° Placer le navire à l'un quelconque des quatre caps cardinaux magnétiques, le Nord par exemple. Annuler à ce cap la déviation au moyen d'aimants transversaux.

4° Placer le navire au cap magnétique suivant, l'Est par exemple. Annuler la déviation à ce cap au moyen d'aimants longitudinaux par paires.

5° Venir au cap magnétique suivant, le Sud dans le cas actuel; remanier les aimants transversaux, de manière à détruire la moitié de la déviation résiduelle à ce cap.

6° Venir au cap magnétique suivant, l'Ouest dans le cas actuel; remanier les aimants longitudinaux, de manière à détruire la moitié de la déviation résiduelle à ce cap.

7° Quand on aura changé notablement de latitude magnétique, on dosera le Flinders comme il a été expliqué au paragraphe 35.

55. Méthode rapide de compensation quand A et E sont négligeables. — La loi des déviations est alors donnée par la formule d'Archibald Smith réduite :

$$\delta = B \sin Z_c + C \cos Z_c + D \sin 2Z_c.$$

On déterminera d'abord la valeur de D par la formule

$$D = \frac{\delta_{NE} - \delta_{SE} + \delta_{SO} - \delta_{NO}}{4},$$

et on mettra les globes en place à la distance voulue d'après la valeur de D, en consultant le tableau. On orientera les globes T^d — B^d si D est positif, Ꞥ — Ꞧ si D est négatif. Alors la loi de la déviation du compas devient :

$$\delta = B \sin Z_c + C \cos Z_c.$$

Mettons le cap à l'un quelconque des points cardinaux magnétiques, le Nord par exemple; en introduisant des aimants transversaux, nous modifions le coefficient du terme en $\cos Z_c$, qui prend une nouvelle valeur C′; alors, par tâtonnement, modifions le nombre ou l'emplacement de ces aimants jusqu'à ce que la déviation soit nulle. On aura, à ce moment, C étant devenu C″ :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_c = Z_m = 0.$$

Donc $$0 = B \times 0 + C'' \times 1 ;$$

d'où $$C'' = 0.$$

La formule des déviations est donc actuellement :

$$\delta = B \sin Z_c.$$

Mettons le cap à l'Est ou à l'Ouest magnétique; introduisons dans le fût du compas, par paires, des aimants longitudinaux. Nous modifions le coefficient de $\sin Z_c$, qui prend une valeur nouvelle B′. Modifions alors l'emplacement des aimants longitudinaux ou leur nombre jusqu'à ce que la déviation soit nulle. Le coefficient B aura pris une valeur nouvelle B″, et on aura à ce moment :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_m = Z_c = 90^\circ.$$

Donc $$0 = B'' \times 1 ;$$

d'où $$B'' = 0.$$

Désormais la déviation est nulle à tous les caps, puisque la loi de la déviation est maintenant :

$$\delta = 0 \times \sin Z_c + 0 \times \cos Z_c + 0 \times \sin 2Z_c.$$

Plus tard, quand on changera de latitude magnétique, il faudra doser le Flinders, comme il a été expliqué au paragraphe 53.

56. **Ordre à suivre pour les caps de compensation.** — On peut commencer l'opération par l'un quelconque des caps cardinaux, puis faire le tour et venir aux caps suivants ; mais il faut avoir soin de compenser les déviations au Nord ou au Sud magnétiques par des aimants transversaux, à l'Est ou à l'Ouest par des aimants longitudinaux.

On peut remarquer que, dans toutes les opérations, les aimants correcteurs sont chaque fois placés perpendiculairement au méridien magnétique.

Remarquez que les aimants longitudinaux sont mis par paires, c'est-à-dire autant à tribord qu'à bâbord. La raison en est : 1° Que la déviation, le cap à l'Est, étant généralement beaucoup plus grande que celle au Nord, il faut plusieurs aimants pour la compenser. Si on les plaçait tous d'un même côté, on créerait autour de la rose un champ magnétique irrégulier. 2° Ces aimants, placés d'une manière dissymétrique par rapport à la barre de Flinders, pourraient produire par induction un déplacement latéral des pôles de cette barre.

57. **Méthode rapide de compensation sans connaître les coefficients, pour un compas placé dans le plan longitudinal.** — En cas d'urgence, on peut compenser le compas de la manière suivante :

Mettre le cap à l'un des points cardinaux magnétiques, compenser la déviation à ce cap au moyen d'aimants transversaux si on a mis tout d'abord le cap au Nord ou au Sud, avec des aimants longitudinaux par paires si on a commencé par mettre le cap à l'Est ou à l'Ouest. Puis venir au cap

magnétique voisin du premier et détruire la déviation à ce cap avec les aimants longitudinaux si ce second cap est l'Est ou l'Ouest, avec les aimants transversaux dans le cas où ce second cap serait le Nord ou le Sud.

Venir ensuite à un cap intercardinal magnétique voisin du dernier, et à ce cap annuler par tâtonnement la déviation au moyen des globes compensateurs.

En effet, supposons, pour fixer les idées, qu'on ait mis le cap au Nord magnétique en commençant. L'introduction des aimants transversaux modifie le coefficient du terme en $\cos Z_c$, qui prend une certaine valeur C'.

Au moment où la déviation est nulle, ce coefficient prend une certaine valeur C''.

On a alors :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_m = Z_c = 0.$$

Donc $$0 = B \times 0 + C'' \times 1 + D \times 0;$$

d'où $$C'' = 0.$$

Désormais la loi des déviations est :

$$\delta = B \sin Z_c + D \sin 2Z_c.$$

L'introduction d'aimants longitudinaux, le cap à l'Est magnétique, modifie le coefficient de $\sin Z_c$.

Au moment où la déviation est nulle, ce coefficient a pris une certaine valeur B''. On a alors :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_m = Z_c = 90^o.$$

Donc $$0 = B'' \times 1 + D \times 0;$$

d'où $$B'' = 0.$$

Dès lors, la loi des déviations devient :

$$\delta = D \sin 2Z_c.$$

Mettons le cap au Sud-Est magnétique. La mise en place des globes compensateurs modifie le coefficient D, qui, au moment où, par tâtonnement, on a rendu la déviation nulle, prend une valeur spéciale D''. On a alors :

$$\delta = 0 \quad \text{et} \quad Z_m = Z_c = 135^o.$$

Donc $0 = D'' \times \sin 270^\circ$,

ou $0 = D'' \times -1$;

d'où $D'' = 0$.

Tous les coefficients sont nuls. La déviation est détruite à tous les caps.

La compensation ainsi faite n'est suffisante que si on ne doit pas changer de latitude magnétique. Si on doit changer de latitude magnétique, on procédera de la manière suivante :

Comme on ne connaît pas la valeur de B au départ, on ne peut doser le Flinders par calcul; il faut recourir à la règle empirique suivante énoncée par *Thomson.*

Au départ, on compensera la déviation, le cap à l'Est ou à l'Ouest magnétiques, pour moitié avec les aimants longitudinaux (par paires), pour moitié par le Flinders. Quand, plus tard, on se trouvera dans des lieux de latitude magnétique plus faible, si on retrouve de la déviation, le cap à l'Est ou à l'Ouest magnétiques, on la détruira en modifiant le nombre ou l'emplacement des aimants longitudinaux. Si, au contraire, on se trouve, la seconde fois, dans un lieu de latitude magnétique plus forte, on annulera la déviation, le cap à l'Est ou à l'Ouest magnétiques, en modifiant l'emplacement ou la longueur du Flinders.

Si on passe à *l'équateur magnétique,* on pourra démonter le Flinders, qui est sans action; on annulera la déviation, le cap à l'Est ou à l'Ouest, uniquement au moyen d'aimants longitudinaux, et plus tard, quand on se trouvera en un lieu de latitude magnétique appréciable, si on trouve de la déviation, le cap à l'Est ou à l'Ouest magnétiques, on la détruira en mettant en place le Flinders. La compensation ainsi faite est alors rigoureuse.

TROISIÈME PARTIE

NOTES COMPLÉMENTAIRES

RELATIVES

A LA COMPENSATION DES COMPAS

58. **Effet des aimants compensateurs.** — Pour compenser les déviations causées par le fer dur, le compas Thomson porte dans la partie inférieure de son fût des cases destinées à recevoir les aimants compensateurs. Nous allons examiner comment agit un de ces aimants placé dans une des cases du compas. Au moment où on introduit cet aimant AB, sa direction est perpendiculaire au plan vertical qui contient l'aiguille aimantée. Les masses magnétiques de cet aimant, de valeur m, produisent le même effet que des masses réduites m' placées en N, S, dans le plan de la rose.

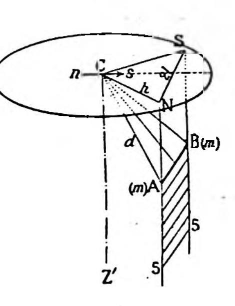


Fig. 39.

Ces masses réduites ont pour valeur :

$$m' = m \cos^3 (h \,.\, d), \qquad \text{ou} \qquad \frac{mh^3}{d^3}.$$

Cherchons l'effet que produiront ces masses réduites sur l'aiguille aimantée.

Soit NS l'aimant des masses réduites ainsi défini.

Au pôle s de l'aiguille aimantée (fig. 40) s'exercent deux forces égales f, f', dont la résultante F est perpendiculaire à ns. En n s'exercent deux forces égales φ, φ', dont la résultante Φ est perpendiculaire à ns. Vu les petites dimensions

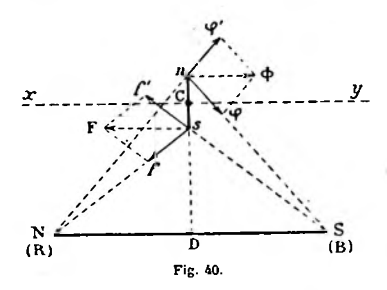


Fig. 40.

de l'aiguille, Φ est sensiblement égal à F, et l'aimant fictif NS de masses réduites $m' = \frac{mh^3}{d^3}$ agit comme s'il engendrait un couple dont les forces égales F et Φ sont perpendiculaires à ns.

Calculons la valeur de ces forces.

Si on appelle h la longueur Ns, sensiblement égale à NC, la valeur de f (action de N sur l'unité de masse magnétique de l'aiguille) sera donnée par la formule

$$f = \frac{m'}{h^2},$$

ou, en remplaçant m' par sa valeur $\frac{mh^3}{d^3}$,

$$f = \frac{mh^3}{d^3 \times h^2} = \frac{mh}{d^3}.$$

Cherchons F.

Les triangles semblables Fsf, NsS donnent, en désignant par $2l$ la longueur du barreau NS :

$$\frac{F}{2l} = \frac{f}{h};$$

d'où $$F = \frac{2lf}{h},$$

ou $$F = \frac{2l}{h} \times \frac{mh}{d^3},$$

et $$F = \frac{2ml}{d^3}.$$

Les forces F, Φ, sensiblement égales, sont donc inversement proportionnelles aux cubes des distances du centre de la rose aux extrémités des logettes des aimants compensateurs.

C'est d'après cette loi qu'ont été numérotées les logettes superposées destinées à recevoir les aimants compensateurs.

Toutes les logettes se trouvent placées à la partie inférieure du fût du compas.

La logette la plus haute porte le numéro 20, la plus basse le numéro 4 ou 5.

Le numéro 1 se trouverait trop bas et n'existe pas. Les nombres ainsi marqués sont proportionnels aux déviations que produirait un même aimant si on le déplaçait d'une case à une autre.

Si on appelle d, d', d'', d''' les diverses distances du centre de la rose aux extrémités des diverses cases, δ, δ', δ'', δ''' les déviations que produirait le même aimant transporté successivement dans chacune des cases, on a :

$$d^3\delta = d'^3\delta' = d''^3\delta'' = d'''^3\delta''',$$

ou $$d\sqrt[3]{\delta} = d'\sqrt[3]{\delta'} = d''\sqrt[3]{\delta''} = d'''\sqrt[3]{\delta'''}.$$

Autant que possible on emploie les cases les plus basses, en y mettant au besoin plusieurs aimants afin d'obtenir un champ magnétique plus régulier autour de l'aiguille.

Au besoin on se sert d'aimants plus petits comme diamètres. Leur effet est à peu près le quart de l'effet des gros.

On peut se demander pourquoi il existe une seule rangée de logettes transversales pour les aimants compensateurs,

tandis qu'il y en a deux pour les aimants longitudinaux qu'on doit mettre par paires dans ces logettes (un à tribord, un à bâbord, ou deux à tribord, deux à bâbord, etc.). S'il en est ainsi, c'est que l'expérience a montré que les déviations, le cap au Nord ou au Sud, sont généralement assez faibles, tandis que les déviations, le cap à l'Est ou à l'Ouest, sont beaucoup plus grandes. En d'autres termes, le magnétisme permanent du navire se comporte comme si l'ensemble des tôles du navire créait dans ce navire un aimant permanent longitudinal ou à peu près. Un pareil aimant ne produirait que de faibles déviations le cap au Nord ou au Sud, mais donnerait de fortes déviations si on mettait le cap à l'Est ou à l'Ouest.

59. **Pesée ou dosage des aimants correcteurs.** — Afin d'éviter des tâtonnements, on peut *peser* les aimants compensateurs de la manière suivante : Ayant le cap au Nord magnétique, on introduit dans la case 20 l'aimant à peser. On lit la déviation produite, on retourne l'aimant, on obtient une déviation en sens contraire. On fait la moyenne arithmétique des deux déviations. On la divise par 20; on connaît ainsi la déviation α qui serait produite si on plaçait cet aimant à la case 1 [1]. Les déviations produites sont d'ailleurs proportionnelles aux numéros des cases.

Supposons qu'avec cet aimant on veuille, le cap au N_m, annuler $C = 3^\circ,5$ NE. On a trouvé : $\alpha = 0^\circ,5$.

$$n = \frac{3,5}{0,5} = 7$$

donne le numéro de la case où on doit placer l'aimant en question.

Le nombre α devra être inscrit sur un papier collé sur l'aimant.

Si C est grand, on est obligé de placer un ou deux aimants très près de la rose. L'expérience montre qu'il

[1] Cette case 1 n'existe pas. Elle serait placée trop bas. Les cases, le plus souvent, commencent au numéro 6.

vaut mieux en placer un plus grand nombre dans les cases les plus basses, afin que le champ magnétique créé autour du compas soit plus régulier.

On résoudra alors, par tâtonnement, l'égalité

$$n_1\alpha_1 + n_2\alpha_2 + n_3\alpha_3 + \text{etc.} = C,$$

n_1, n_2, n_3, n_4... représentant les numéros des cases où on logera les aimants de poids α_1, α_2, α_3...

Exemple : $C = +14°$,

$$\alpha_1 = 0°,6, \quad \alpha_2 = 0°,7, \quad \alpha_3 = 0,4, \quad \alpha_4 = 0°,5.$$

La case supérieure a le numéro 20, la case inférieure le numéro 5.

On écrira :

$$\begin{aligned} 5 \times 0°6, &= 3°,0 \\ 6 \times 0°,7 &= 4°,2 \\ 7 \times 0°,4 &= 2°,8 \\ 8 \times 0°5, &= 4°,0 \\ \text{Total} &= 14°,0 \end{aligned}$$

Quatre aimants placés aux cases 5, 6, 7, 8 résolvent donc la question.

Pour annuler B, on calculera le nombre d'aimants à mettre dans les cases longitudinales par la formule

$$n_1\alpha_1 + n_2\alpha_2 + n_3\alpha_3 + \ldots = B.$$

On devra répartir ces aimants également dans les cases de T^d et de B^d.

60. Effet de la barre de Flinders. — La barre de Flinders est destinée à compenser l'effet du fer doux vertical. Elle se compose d'une série de cylindres de fer doux d'un même diamètre, mais de longueurs variées. En temps ordinaire, la gaine en cuivre destinée à loger le Flinders pour la compensation est remplie de cylindres en bois de mêmes dimensions que les cylindres de fer doux qui constituent le Flinders. Le pôle supérieur de la barre devant être dans le plan de la rose, c'est par en bas qu'on allonge la barre s'il le faut, en substituant les cylindres en fer aux cylindres

de bois. En faisant cela, on donne plus d'action au pôle supérieur de la barre, puisque, ce pôle demeurant dans le plan de la rose, on éloigne de cette rose, en allongeant la barre par en bas, le pôle inférieur du Flinders, qui contrarie d'autant moins l'action du pôle supérieur qu'il se trouve plus éloigné de la rose.

On ne peut pas dire *a priori* que le Flinders devra être placé sur l'avant ou sur l'arrière. On ne le sait que quand on a calculé le terme y' de la formule $B' = x' + y'$.

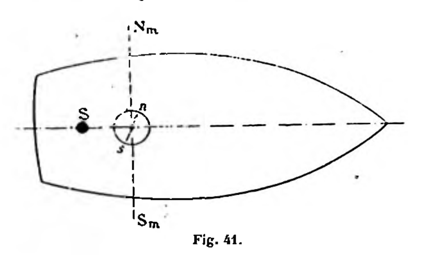


Fig. 41.

Si y', qui représente la déviation causée par le fer doux vertical du bord, est positif, le Flinders doit être sur l'Æ dans l'hémisphère magnétique Nord, sur l'Ꝟ dans l'hémisphère magnétique Sud; si y' est négatif, il doit être sur l'Ꝟ dans l'hémisphère magnétique Nord, sur l'Æ dans l'hémisphère magnétique Sud. Ce changement se fait en dévissant les quatre boulons qui vissent au pont le fût du compas et retournant le tout de 180 degrés. La figure 41, applicable à l'hémisphère Nord, montre le premier des quatre cas énoncés (y' positif, hémisphère Nord).

Les figures 42, 43 indiquent diverses dispositions de fer doux vertical qui exigent que le Flinders soit placé sur l'Ꝟ ou sur l'Æ, l'observateur étant censé placé dans l'hémisphère magnétique Nord.

En changeant les noms des pôles, les figures s'appliquent à l'hémisphère Sud.

Remarquez, en passant, que si le compas est au niveau

du milieu d'une barre de fer doux verticale, cette barre ne dévie pas le compas, ses deux pôles exerçant des actions

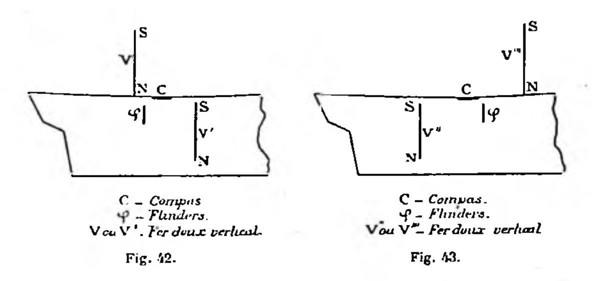


Fig. 42.

Fig. 43.

égales, mais contraires : s'il est plus haut que le milieu, c'est le pôle supérieur qui l'emporte; s'il est plus bas, c'est le pôle inférieur.

61. **Globes compensateurs.** — Les globes compensateurs destinés à compenser la déviation quadrantale sont des sphères creuses en fer doux. On les installe sur des potences qui permettent de les éloigner ou de les approcher de la rose.

Ces globes de fer doux s'aimantent par induction du champ magnétique terrestre et peuvent être considérés comme contenant un aimant très court placé à leur centre. Cet aimant demeure parallèle à l'aiguille d'inclinaison quand le bâtiment change de cap.

Ils produisent à peu près le même effet que deux barres de fer doux horizontales distinctes placées de part et d'autre du compas, leurs axes orientés vers le centre de la rose.

Diverses combinaisons de fer doux horizontal à bord peuvent faire que le coefficient D de la formule d'Archibald Smith soit positif ou négatif. Si ce coefficient est positif, les globes doivent être placés T^d — B^d. Si ce coefficient D est négatif, ils doivent être Ꭿ — Ꭿ.

Les figures 44, 45, 46, 47, relatives à l'hémisphère magnétique Nord, indiquent diverses combinaisons de fers doux horizontaux avec la disposition correspondante des globes.

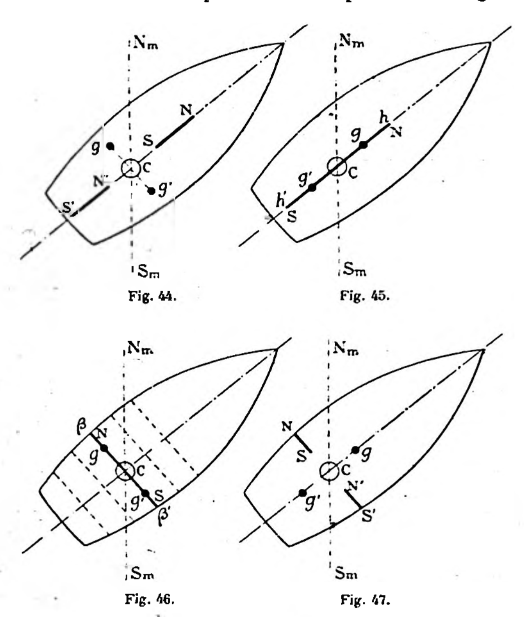


Fig. 44. Fig. 45.

Fig. 46. Fig. 47.

Ces figures sont encore vraies dans l'hémisphère magnétique Sud, en changeant les noms des pôles inscrits sur le dessin.

Ce qui fait que le plus souvent les globes sont placés T^dB^d, c'est que la partie la plus importante du fer doux est constituée par les baux du navire, qui peuvent être fictivement remplacés par un bau unique ββ' (fig. 46), passant en dessous de la rose. Quand le navire a le cap au NE, dans nos régions, β est un pôle rouge (Nord) qui repousse la

pointe N de l'aiguille aimantée. Les globes placés $T^d B^d$ ramènent alors l'aiguille vers la gauche. Il est clair que, s'il y avait en dessous de la rose une forte hiloire longitudinale *hh'* (fig. 45) en fer doux, les globes devraient être A/ — /R. Remarquez que deux barres de fer doux interrompues à la rose produisent l'effet inverse d'une barre unique passant sous la rose, et exigent un déplacement de 90 degrés des globes compensateurs.

Il en est de même plus généralement du fer horizontal oblique. Une barre interrompue à la rose, ou deux barres interrompues, exigent l'emplacement des globes perpendiculaire à la barre. Une barre unique qui traverse sous

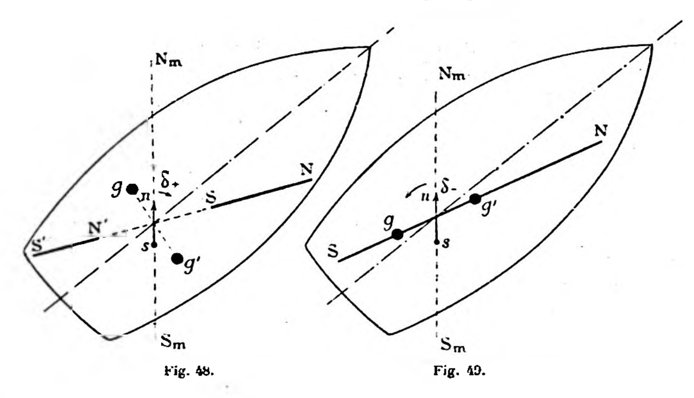


Fig. 48.

Fig. 49.

la rose exige les globes dans le sens de la barre (fig. 48 et 49).

Comme on ignore presque toujours quels sont les fers doux qui dévient le compas, ce n'est que par la connaissance des coefficients D et E qu'on peut connaître l'emplacement exact à donner aux globes.

62. Remarque sur les fers qui dévient le compas à certains caps. — Supposons le compas dans l'axe du

navire et les fers répartis symétriquement. Quand le navire a le cap au Nord magnétique, les fers durs longitudinaux et le fer doux vertical longitudinal sont sans influence sur l'aiguille aimantée, puisqu'ils travaillent dans le sens de la longueur de l'aiguille. Le fer doux horizontal longitudinal ne dévie pas non plus l'aiguille par la même raison. Le fer doux horizontal transversal étant *Est-Ouest* est désaimanté. Il n'y a à dévier le compas à ce cap que le fer dur transversal et le fer doux vertical transversal.

Et encore on admet que, dans la plupart des cas, le fer doux vertical transversal n'existe pas, parce qu'on a soin de ne pas placer le compas par le travers d'une cheminée, d'une manche à vent, etc.

On voit par là pourquoi on met, pour la compensation, le cap au Nord magnétique. A ce cap, la cause déviatrice est, en quelque sorte, mise en évidence, et c'est pour cela qu'il suffit d'aimants transversaux dans cette situation du navire.

Quand on met le cap à l'Est magnétique, les fers transversaux doux ou durs, qu'ils soient horizontaux ou verticaux, étant dans l'axe de l'aiguille, ne dévient pas le compas.

Il n'y a à dévier le compas que les fers durs longitudinaux et le fer doux vertical longitudinal. C'est pourquoi, à ce cap, on peut mettre en place les aimants correcteurs longitudinaux et le Flinders.

Une fois qu'on a annulé les déviations produites par les fers indiqués ci-dessus, si on met le cap au NE, il n'y aura plus à dévier le compas que les fers doux horizontaux tant longitudinaux que transversaux, ce qui permet de mettre en place les globes compensateurs pour compenser l'effet de ces fers.

Ceci suppose toutefois que le compas est placé dans le plan longitudinal ou, s'il ne l'est pas, que les fers doux sont symétriques par rapport à lui.

Dans tout autre cas, on doit commencer par déterminer,

par le calcul, l'orientation et l'écartement des globes compensateurs, afin de détruire l'action déviatrice du fer doux oblique, et ne placer qu'ensuite les aimants transversaux ou longitudinaux.

Remarquons enfin qu'à un cap *quelconque,* tous les fers durs et doux déviant le compas, les causes déviatrices se trouvant mélangées, on ne pourrait, à un cap quelconque, compenser le compas exactement, puisqu'on ne pourrait faire la part exacte revenant à chaque compensateur.

63. **Interprétation des coefficients de la formule d'Archibald Smith réduite.** — La formule d'Archibald Smith se réduit quand A et E sont négligeables à

$$\delta = B \sin Z_c + C \cos Z_c + D \sin 2Z_c.$$

Supposons qu'on mette successivement le cap aux points successifs cardinaux et intercardinaux. On aura :

$$\begin{aligned}
\delta_N &= C,\\
\delta_{NE} &= S_4B + S_4C + D,\\
\delta_E &= B,\\
\delta_{SE} &= S_4B - S_4C - D,\\
\delta_S &= -\ C,\\
\delta_{SO} &= -S_4B - S_4C + D,\\
\delta_O &= -B,\\
\delta_{NO} &= -S_4B + S_4C - D.
\end{aligned}$$

On voit : que C représente la déviation, le cap au Nord, avec son signe, ou la déviation, le cap au Sud, en signe contraire; que B représente la déviation, le cap à l'Est, avec son signe, ou la déviation, le cap à l'Ouest, en signe contraire. Si on avait annulé par des aimants correcteurs les coefficients B et C, D représenterait : la déviation, le cap au NE ou au SO, avec son signe; la déviation, le cap au SE ou au NO, en signe contraire.

Si B et C ne sont pas nuls, on a évidemment, formule déjà établie :

$$D = \frac{\delta_{NE} - \delta_{SE} + \delta_{SO} - \delta_{NO}}{4}.$$

64. Placer le navire à un cap magnétique donné. — Le moyen le plus pratique consiste à regarder à l'avance, sur la carte, quel sera, de la bouée de réglage, le relèvement magnétique d'un point remarquable éloigné d'au moins 5 milles. Ainsi, à Marseille, le poste de réglage de la rade d'Endoume comporte cinq bouées. Quatre de ces bouées forment un carré dont la cinquième occupe le centre. De la bouée centrale, le relèvement magnétique de Planier est le S 63 O. On obtiendrait ce résultat en marquant, au besoin, sur une carte de la rade, la position de la bouée centrale, déterminée par segments capables, au moyen de distances angulaires (prises au sextant, de cette bouée), de trois points les plus proches possibles de la bouée. En joignant la position de la bouée à Planier et lisant l'angle que fait cette ligne avec un méridien, on connaît le relèvement vrai de Planier. Ce relèvement est le S 51 O. Corrigeant ce relèvement de la déclinaison de l'aiguille aimantée (12 NO) en sens contraire, on obtient le relèvement magnétique S 63 O.

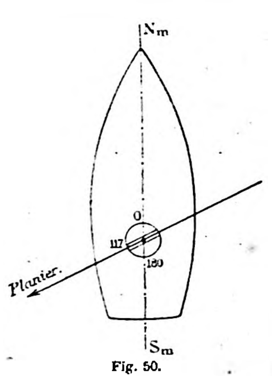


Fig. 50.

Supposons qu'on veuille mettre le cap au Nord magnétique. Si on suppose le problème résolu, l'avant étant dirigé vers le Nord magnétique (fig. 50), puisque Planier est au S 63 O, on devra apercevoir Planier à 117° de l'A sur la gauche. On placera donc l'alidade, l'objectif à la graduation 117 du cercle en cuivre (gradué de 0 à 360 degrés en sens inverse de la montre), qui surmonte la cuvette du compas. Au moyen des amarres, on amènera le navire le cap au Nord du compas ou à peu près.

A ce moment, Planier sera presque dans la direction de l'alidade. On manœuvrera les amarres de façon que, l'alidade demeurant à la graduation 117, on aperçoive Planier exactement par le fil objectif de l'alidade.

A défaut de cercle en cuivre sur le compas, on emploie un théodolite placé près du compas. On marque à la craie, sur la lisse, une parallèle au plan longitudinal passant par le centre du théodolite, et on se sert du théodolite exactement comme on vient de le faire du cercle gradué qui surmonte la cuvette.

En mer, on peut, au moyen de relèvement du Soleil, placer pareillement le navire à un cap magnétique quelconque. Pour cela, on détermine préalablement, par les tables d'azimuts, les azimuts vrais et magnétiques du Soleil pour la durée probable des opérations, de 10 en 10 minutes à la montre et au compteur. Ces renseignements étant marqués sur le carnet, supposons qu'on veuille placer le navire le cap au Nord magnétique. Le carnet dit qu'à 10 heures 40 minutes du compteur, le relèvement magnétique du soleil sera le S 80 E. Il est au compteur 10 heures 34 minutes. Quand le navire aura le cap au Nord magnétique, on devra apercevoir le Soleil à $180^\circ + 80^\circ$ ou 260° de l'avant vers la gauche. On placera l'alidade, son objectif à la graduation 260 du cercle gradué. Au moyen de la barre, on mettra le cap au Nord du compas, puis on manœuvrera doucement la barre, de façon qu'à 10 heures 40 minutes du compteur le Soleil soit dans le sens de l'alidade demeurée à la graduation 260 degrés.

65. **Manœuvre des aimants correcteurs.** — Supposons que, le navire ayant le cap au Nord magnétique, on constate une déviation de 4 degrés NE. Le Nord de la rose tombe 4 degrés à droite de la ligne de foi (fig. 51). Il faut donc que la rose tourne de 4 degrés sur la gauche. On placera donc un aimant correcteur dans une des logettes transversales, le bout bleu à bâbord ; on modifiera par tâtonne-

ment son emplacement en hauteur jusqu'à ce que le Nord de la rose ait tourné à venir toucher la ligne de foi.

Il est recommandé, quand la déviation à corriger est grande, de placer plutôt plusieurs aimants dans les logettes inférieures, qu'un seul aimant dans une logette supérieure.

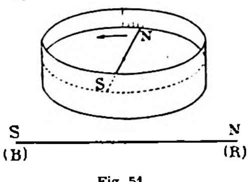


Fig. 51.

Le champ magnétique ainsi créé est plus régulier que par le second système.

Ne pas oublier que les petits aimants ont un effet à peu près égal au quart de l'effet des gros aimants.

Pendant la manœuvre des aimants, qui se fait un à un, tenir la boîte aux aimants au moins à 10 mètres du compas. Les aimants doivent être placés dans cette boîte deux par deux, leurs pôles contraires à se toucher.

QUATRIÈME PARTIE

DÉVIATION A LA BANDE

ERREUR GAUSSIN

---

66. **Déviation à la bande.** — L'expérience fait savoir que, quand un navire fait des routes voisines du Nord ou du Sud, s'il se met à la bande, la pointe Nord de l'aiguille est généralement déviée au vent.

Cette déviation anormale provient de ce que :

1° Tous les fers du bord changent de position par rapport à la rose qui demeure horizontale ;

2° Les fers doux, tant horizontaux que verticaux, changent de position par rapport à l'aiguille d'inclinaison. Par suite, leur magnétisme, par induction terrestre, est modifié.

En particulier, les baux du navire, qui, si on les suppose en fer doux, sont désaimantés, étant orientés Est-Ouest, quand le navire a le cap au Nord ou au Sud, s'aimantent par induction terrestre quand le navire se met à la bande. La partie la plus basse devient (dans nos régions) un pôle Nord (rouge), la partie la plus haute un pôle Sud (bleu).

A ce moment, l'aiguille aimantée se trouve déviée au vent (fig. 52).

On démontre que le terme le plus important de l'erreur de bande est donné par la formule

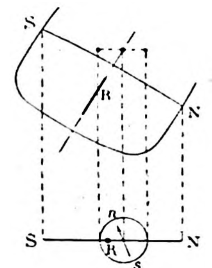


Fig. 52.

$$\delta = Ji \cos Z^c,$$

i désignant la bande en degrés, J un facteur constant dépendant des fers du bord.

Ainsi, pour $J = 1°,4$, $Z_c = 60°$, et $i = 10°$, on aura :

$$\delta = 1°,4 \times 10 \times 0,5 = 7°.$$

Pour pouvoir tenir compte de la déviation à la bande, il suffit de déterminer J, en mesurant la déviation anormale produite par la bande, à un cap voisin du Nord ou du Sud.

Ainsi, si ayant le cap au N 30 E, par une bande 10 degrés, on trouve une déviation au vent égale à 12 degrés, on aura :

$$J = \frac{\delta}{i \cos Z_c} = \frac{12}{10 \times 0,866} = 1°,4.$$

Certains compas Thomson portent en dessous de la rose un tube vertical, dans lequel on introduit un aimant qu'on peut élever ou abaisser au moyen d'une chaînette. Si l'aiguille est déviée au vent (fig. 39), il faudra introduire l'aimant de bande le Nord (rouge) en haut. L'extrémité rouge, se déplaçant en projection au vent de l'aiguille quand le navire se met en bande, la ramène au Nord magnétique. Au contraire, quand le navire est droit, l'aimant de bande, étant exactement en dessous du centre de l'aiguille, ne produit aucune déviation.

La compensation de l'erreur de bande par un aimant n'est pas rigoureuse, puisqu'elle oppose du fer dur à des déviations en grande partie causées par du fer doux. Il faudra probablement rectifier cette compensation quand le navire changera de latitude magnétique.

Une partie de l'erreur de bande provient du changement de magnétisme des fers doux verticaux du navire. Quand la

barre de Flinders est convenablement dosée, elle compense à peu près totalement cette partie spéciale de l'erreur de bande.

Au cas où on n'aurait pas compensé l'erreur de bande, on ne doit pas perdre de vue que, même si la déviation est nulle le navire droit, on doit, si le navire navigue avec un peu de bande, s'attendre à trouver plusieurs degrés de déviation, principalement aux caps voisins du Nord ou du Sud. Il faut donc mesurer cette déviation anormale avec le plus grand soin si on veut éviter des erreurs de route.

67. **Erreur Gaussin.** — Beaucoup de marins avaient constaté, en doublant certaines pointes et changeant de route à ce moment, que le compas, même compensé, subissait à ce moment des déviations anormales. Ils attribuaient ces déviations anormales à des montagnes ferrugineuses constituant ces promontoires. Bien qu'il ne soit pas impossible qu'un tel phénomène puisse se produire, dans la plupart des cas ces déviations exceptionnelles proviennent des inductions tenaces des fers imparfaitement doux du navire.

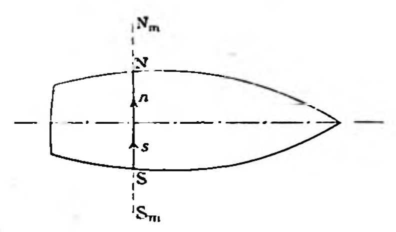


Fig. 53.

L'ingénieur hydrographe Gaussin a signalé le premier la cause de ces déviations.

Supposons qu'un navire gouverne longtemps le cap à l'Est ou à l'Ouest. Les baux du navire, supposés en fer doux, s'aimantent par induction terrestre. Nous pouvons

les remplacer par une barre unique fictive NS de fer doux (fig. 53). Il n'y a pas de déviation du compas, cette barre étant dans le sens de l'aiguille *ns*.

Supposons actuellement que le navire mette le cap au Nord (fig. 54). Si les baux étaient en fer parfaitement pur (fer doux), se trouvant maintenant Est-Ouest, ils se désaimanteraient instantanément. Mais, comme ils sont en fer imparfaitement doux, ils conservent, pendant un temps plus ou moins long, l'aimantation acquise par induction du champ terrestre, pendant des routes prolongées à l'Est ou à l'Ouest. On voit facilement (fig. 54) qu'il doit se produire, au moment où le navire vient le cap au Nord ou Sud, une déviation *du bord opposé à l'abattée.* Cette déviation anormale ne cesse que quand les baux ont perdu peu à peu le magnétisme emmagasiné pendant les routes Est-Ouest. Souvent, au bout de douze heures, cette déviation, qui peut atteindre 5, 6 et même 10 degrés, est tombée à moitié de sa valeur. Elle a presque toujours disparu au bout de vingt-quatre heures. Elle diminue d'ailleurs d'autant plus rapidement que la mer est plus agitée et que les trépidations de l'hélice ébranlent plus fortement la charpente métallique du navire.

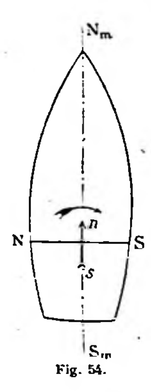


Fig. 54.

On ne peut dire à l'avance de combien sera la déviation dont nous venons de parler, qui prend le nom d'*erreur Gaussin*. On sait, en tous cas, qu'elle se produit presque toujours du bord opposé à l'abattée, dans les circonstances que nous avons dites. Il est rare qu'on la constate quand le navire, ayant longtemps gouverné Nord ou Sud, vient à l'Est ou à l'Ouest, car, pendant les routes Nord ou Sud, les baux placés Est-Ouest ne s'aimantent pas dans le champ magnétique terrestre.

Quoi qu'il en soit, ceci prouve combien le marin doit être prudent dans les changements de route, et nous démontre la nécessité de déterminer directement la variation, quand le navire change de cap, chaque fois que l'état du ciel permet de le faire.

TABLE DES MATIÈRES

PREMIÈRE PARTIE

DÉVIATION DES COMPAS

Notions sur le Magnétisme terrestre.

Causes déviatrices des Compas du bord.

Formules des Déviations.

FERS DURS

FERS DOUX VERTICAUX

FERS DOUX HORIZONTAUX

FERS QUELCONQUES

DEUXIÈME PARTIE

COMPENSATION DES COMPAS

TROISIÈME PARTIE

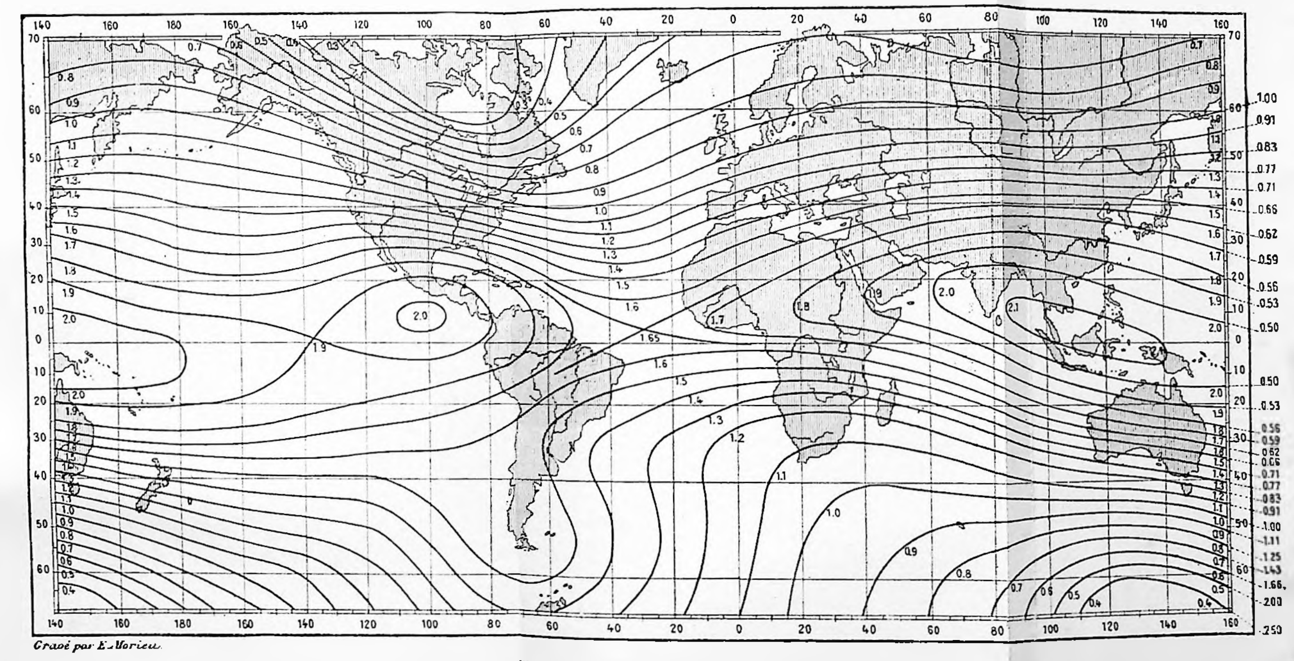
NOTES COMPLÉMENTAIRES RELATIVES A LA COMPENSATION

QUATRIÈME PARTIE

DÉVIATION A LA BANDE. — ERREUR GAUSSIN

CARTES

38410. — Tours, impr. Mame.



Pl. I. — Courbes d'égale force horizontale H.